מדינת ישראל
משרד החינוך

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תשע"ה, 2015
סמל השאלון: 733913
נספחים: א. נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד
ב. נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד
ג. נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק לכיתה י"ד
ד. מילון מונחים

מערכות הספק ומכונות חשמל והינע ה'

למתמחים במערכות הספק פיקוד ובקרה במגמת הנדסת חשמל בקרה ואנרגיה

(כיתה י"ד)

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: ארבע שעות.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה שלושה פרקים ובהם תשע שאלות.
יש להשיב על **ארבע שאלות בלבד: שאלה אחת לפחות** מן הפרק הראשון, **ושאלה אחת לפחות** מן הפרק השני.
לכל שאלה – 25 נקודות, סך־הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. ענה על מספר השאלות הנדרש בשאלון. המעריך יקרא ויעריך את מספר השאלות הנדרש בלבד, לפי סדר כתיבתן במחברתך, ולא יתייחס לתשובות נוספות.
2. התחל כל תשובה לשאלה חדשה בעמוד חדש.
3. רשום את כל תשובותיך **אך ורק בעט.**
4. הקפד לנסח את תשובותיך כהלכה ולסרטט את תרשימיך בבהירות.
5. כתוב את תשובותיך בכתב־יד ברור, כדי לאפשר הערכה נאותה של תשובותיך.
6. אם לדעתך חסרים נתונים הדרושים לפתרון שאלה, אתה רשאי להוסיף אותם, בתנאי שתנמק מדוע הוספת אותם.
7. בכתיבת פתרונות חישוביים, קבלת מֵרַב הנקודות מותנית בהשלמת כל המהלכים שלהלן, בסדר שבו הם רשומים:
   * רישום הנוסחה המתאימה.
   * הצבה של כל הערכים ביחידות המתאימות.
   * חישוב (אפשר באמצעות מחשבון).
   * רישום התוצאה המתקבלת, יחד עם יחידות המידה המתאימות.
   * ליווי הפתרון החישובי בהסבר קצר.
8. לנוחותך, לשאלון זה מצורף מילון מונחים בשפות עברית, אנגלית, רוסית וערבית. תוכל להיעזר בו בעת הצורך.

בשאלון זה 9 עמודים ו־52 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר,
אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

בהצלחה!

המשך מעבר לדף

השאלות

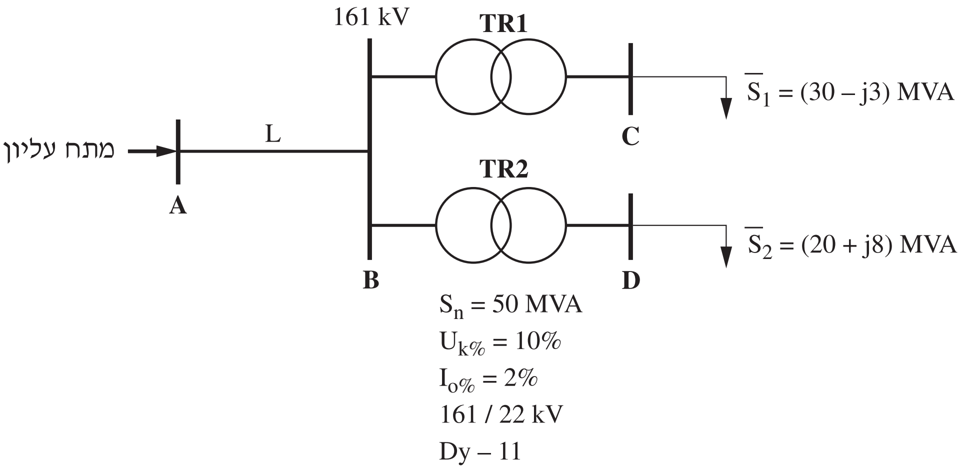
ענה על ארבע מבין השאלות 9–1. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מן הפרק הראשון ועל שאלה אחת לפחות מן הפרק השני.

פרק ראשון: מערכות הספק ב'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 4–1 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 1

באיור לשאלה 1 נתון תרשים חד־קווי של תחנת השנאה. התחנה כוללת שני שנאים זהים, TR1 ו־TR2 , המוזנים במתח עליון באמצעות קו עילי L . מוליכות ענף המיגנוט והתנגדות סלילי השנאי – זניחות.



איור לשאלה 1

א. חשב את ההספק הפעיל ואת ההספק ההיגבי המוזנים לפס־הצבירה B. הנח בחישוביך כי המתחים בפסי־הצבירה C ו־D הם 22 kV .

ב. סרטט מעגל תמורה של הרשת החשמלית מפסי־הצבירה A ועד פסי־הצבירה C ו־D .
ציין בסרטוטך את שמות מרכיבי הרשת.

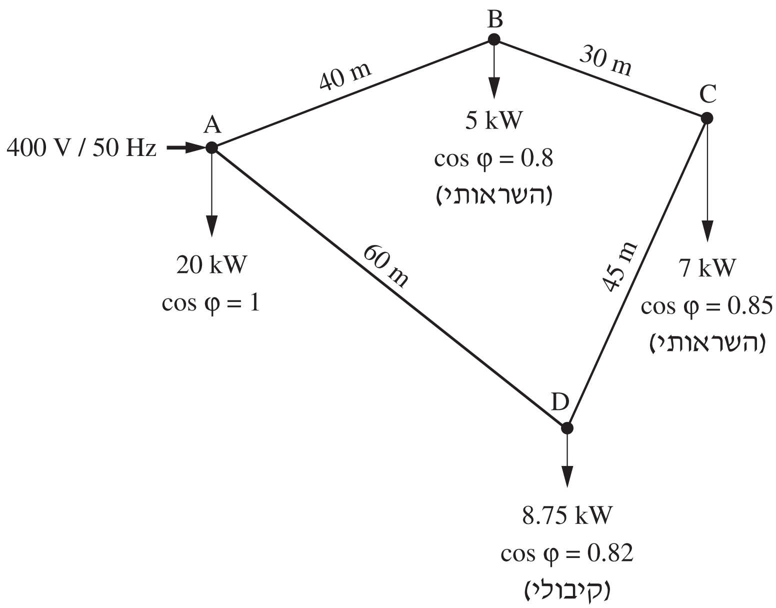
הערה: יַצֵּג בסרטוט רשת עילית במודל π , ושנאי במודל Γ .

המשך בעמוד 3

שאלה 2

באיור לשאלה 2 מתוארת רשת תלת־מופעית המוזנת במתח 400 V / 50 Hz , ומזינה עומסים תלת־מופעיים.

מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\left(\gamma = 57\dfrac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}\right)$, וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא: $X_o = 0.35 \cdot 10^{-3}\dfrac{\Omega}{\text{m}}$.



איור לשאלה 2

א. הנח ששטח־החתך של מוליכי הרשת הוא אחיד, וחשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת (רשום את תשובותיך במספרים מרוכבים – בהצגה קרטזית ובהצגה פולארית).
הערה: חישוב זרמי הצרכנים יתבסס על מתח נקוב של 400 V .

ב. מפל המתח המרבי המותר ברשת הוא 4% ממתח נקוב של 400 V . חשב את מפל המתח ההיגבי (הריאקטיבי) המרבי ואת מפל המתח הפעיל (האקטיבי) המרבי.

המשך בעמוד 4

שאלה 3

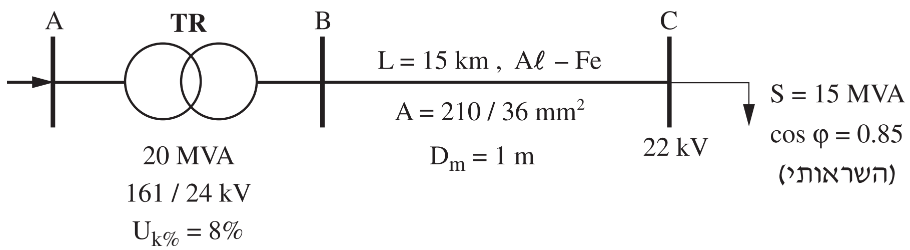
א. קו מתח גבוה מוזן משנאי שנקודת־האפס שלו מוארקת בהארקת שיטה. קצר חד־מופעי לאדמה מתרחש באחד מקווי המופיעים שלו.
איזו הגנה מיועדת להגן על הקו מפני התקלה הזו? נמק את תשובתך.

ב. ציין את תפקידה של הגנה ואטמטרית והסבר את עקרון הפעולה שלה, כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת דרך סליל־כיבוי.

ג. ציין **שלושה** גורמים להיווצרות מתחי־יתר ברשת מתח גבוה.

שאלה 4

באיור לשאלה 4 מתוארות תחנת משנה ורשת חלוקה 24 kV . השנאי TR בעל מספר דרגות לוויסות מתח בצד הראשוני שלו. כל דרגה מאפשרת ויסות של 1.5% מהמתח הנקוב.



איור לשאלה 4

א. חשב את המתח הנדרש בפס־הצבירה B כדי להבטיח שהמתח בפס־הצבירה C יהיה 22 kV .

ב. חשב את מספר הדרגות המזערי (המינימלי) הדרוש לוויסות המתח, כדי להבטיח מתח של 22 kV בפס־הצבירה C .

המשך בעמוד 5

פרק שני: המרת אנרגיה והינע ב'

ענה על שאלה אחת לפחות מבין השאלות 5–7 (לכל שאלה – 25 נקודות).

שאלה 5

נתוניו הנקובים של מנוע השראה תלת־מופעי בעל רוטור מלופף, שסלילי הסטטור בו מחוברים בחיבור משולש, הם:

$P_n = 35\ \text{kW}$; $U_n = 400\ \text{V}$; $n_n = 1440\ \text{rpm}$; $f_1 = 50\ \text{Hz}$;

$\cos\varphi_n = 0.88$; $\eta_n = 88\%$; $s_k = 0.16$; $E_{ph_{2(0)}} = 200\ \text{V}$

הערה: הזנח בחישוביך את איבודי ההספק המכניים $(\Delta P_{mech} = 0)$, והנח כי: $I_{1_{ph}} = I'_{2_{ph}}$.

א. חשב את הזרם בסלילי הסטטור ואת התדר של הזרם בסליל הרוטור כאשר המנוע מועמס בעומס נקוב.

ב. משנים את התדר של מתח־ההזנה מ־$50\ \text{Hz}$ ל־$42\ \text{Hz}$, ובהתאם לכך משתנה גם מתח־ההזנה. חשב את ההיגב הכולל של סלילי המנוע במקרה הזה. הנח בחישוביך שהמומנט הקריטי אינו משתנה.

ג. מזינים את המנוע במתח ובתדר נקובים. חשב את:

1. התנגדות סלילי הרוטור (R_2) .
2. ערכו של הנגד שיש לחבר בטור לכל סליל ברוטור, כדי שמהירות־הסיבוב של המנוע במומנט נקוב תרד ל־$1200\ \text{rpm}$.

המשך בעמוד 6

שאלה 6

נתוניו הנקובים של מנוע סינכרוני, שסלילי הסטטור שלו מחוברים בחיבור משולש, הם:

$U_n = 600\ V$; $I_{1_n} = 95\ A$; $n_n = 1000\ rpm$; $\cos\varphi_n = 0.8$ (השראותי) ; $\eta_n = 86\%$

כמו־כן נתון:

$X_s = 2.3\ \Omega$; $R_a = 0\ \Omega$

א. חשב את המומנט על ציר המנוע.

ב. חשב את הכא"מ המופעי ואת זווית העומס (הזווית בין המתח לכא"מ), כאשר המנוע מועמס בעומס נקוב.

ג. מגדילים את הכא"מ ב־20% , כאשר המנוע פועל בעומס נקוב ובנצילות נקובה. חשב את:

1. הזרם הנצרך מהרשת.
2. מקדם ההספק של המנוע ואופיו (קיבולי או השראותי).

שאלה 7

נתוניו הנקובים של מנוע לזרם ישר בעירור זר הם:

$P_n = 100\ kW$; $V_n = 250\ V$; $I_{a_n} = 435\ A$; $R_a = 0.025\ \Omega$

סליל העירור מוזן ממקור־מתח נפרד, ומפל המתח על המברשות – זניח.

כדי לשנות את מהירות הסיבוב של המנוע משתמשים בשיטת שינוי מתח ההזנה לעוגן.

חשב את:

א. זרם העוגן ברגע התנעת המנוע $(t = 0^+)$ כאשר המנוע מוזן מתח נקוב.

ב. ערך הנגד שיש לחבר בטור לעוגן, כדי להגביל את המומנט האלקטרו־מגנטי בהתנעה לערך הגדול פי 2 מהמומנט האלקטרו־מגנטי הנקוב.

ג. מהירות הסיבוב הנקובה של המנוע, אם ידוע שמהירות הסיבוב שלו בריקם היא $n_0 = 2000\ rpm$.

ד. מתח העוגן הנדרש לקבלת מהירות סיבוב $n = 1200\ rpm$ במומנט נקוב.

המשך בעמוד 7

פרק שלישי: אלקטרוניקה של מערכות הספק

(לכל שאלה – 25 נקודות).

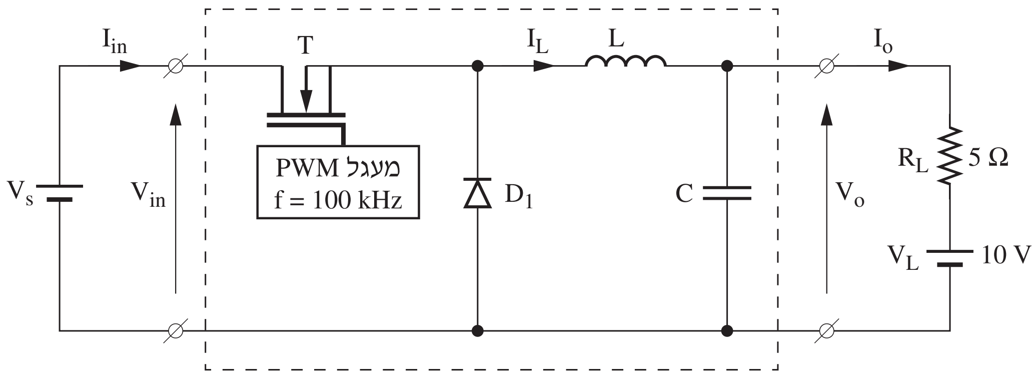
שאלה 8

באיור לשאלה 8 מתואר ממיר ממותג DC / DC אידיאלי (T ו־D_1 אידיאליים), המוזן על־ידי מקור־מתח V_s . במוצא הממיר מחובר עומס הכולל מקור מתח V_L ונגד R_L.

להלן נתוני הממיר האידיאלי: $D = 0.4$, $f = 100\ kHz$, $I_o = 2\ A$.

השינוי בזרם הסליל, ΔI_L , הוא 20% מהזרם הממוצע בסליל ($\Delta I_L = 0.2 \cdot I_L$) .

ממיר ממותג אידיאלי



איור לשאלה 8

א. חשב את מתח המקור V_s .

ב. חשב את השראות הסליל L .

ג. חשב את הקיבול המזערי (המינימלי) של הקבל C , הנדרש כדי שאדוות המתח במוצא תהיה קטנה מ־% 0.5 של מתח־המוצא V_o .

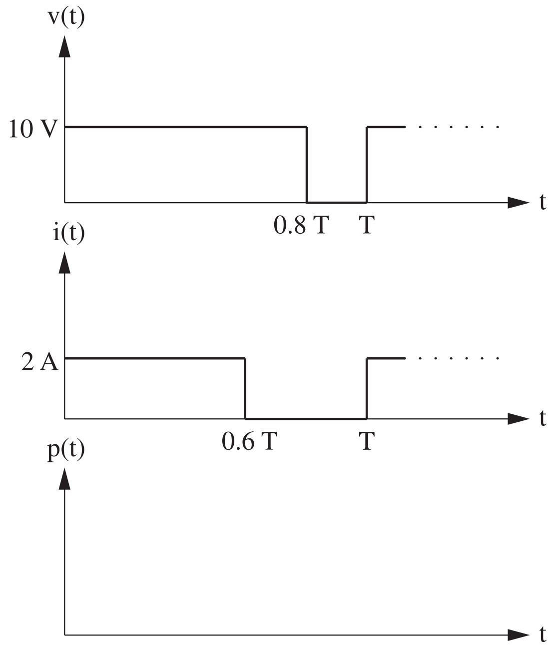
ד. כאשר השינוי בזרם הסליל מקיים: $\Delta I_L = 2 \cdot I_o$, הראה שהזרם בסליל הוא:

$$I_L = \frac{V_{in} \cdot (1 - D) \cdot D \cdot T}{2 \cdot L}$$

המשך בעמוד 8

שאלה 9

א. באיור א' לשאלה 9 נתונות צורות הגלים המחזוריות של זרם ומתח בהתקן חשמלי, לאורך מחזור אחד.

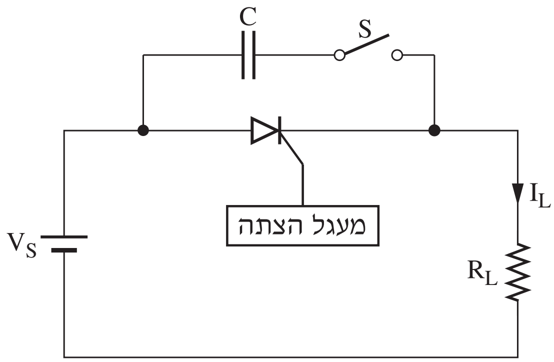


איור א' לשאלה 9

1. העתק את איור א' למחברתך, והשלם בו את צורת הגל של ההספק הזמני $p(t)$.
2. חשב את הזרם היעיל, I_{RMS} , ואת ההספק הממוצע (היעיל), P_{av} , של ההתקן.

המשך בעמוד 9

ב. באיור ב׳ לשאלה נתון מעגל חשמלי, הכולל תיריסטור (SCR) המוצת בנקודת זמן כלשהי. כיבוי ה־SCR מתבצע באמצעות מעגל עזר, הכולל קבל טעון C ומפסק S .



איור ב׳ לשאלה 9

1. קבע את סוג הקומוטציה במעגל הזה. נמק את קביעתך.
2. העתק את איור ב׳ למחברתך, וסמן בו את קוטביות מתח הקבל הנדרשת לביצוע הקומוטציה. נמק את קביעתך.

בהצלחה!

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תשע"ה, 2015
נספח לשאלון: 733913

מדינת ישראל
משרד החינוך

אין להעביר את הנוסחאון לנבחן אחר

מקום למדבקת נבחן

נוסחאון במערכות הספק לכיתה י"ד (16 עמודים)

1. מפלי מתח

מתח ישר

$$\Delta U = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k\ L_k\right)$$

$$\Delta P = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k^2\ L_k\right)$$

מפל מתח מרבי	–	ΔU	[V]
מוליכות סגולית של המוליכים	–	γ	$[m / \Omega mm^2]$
שטח חתך של המוליכים	–	A	$[mm^2]$
זרם בקטע k	–	I_k	[A]
אורך של קטע k	–	L_k	[m]
הפסדי הספק מרביים	–	ΔP	[W]

מתח חילופין חד־מופעי

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$$

$$\Delta U_r = 2\ X_o \sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k\ L_k \sin\varphi_k\right)$$

$$\Delta U_a = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k\ L_k \cos\varphi_k\right)$$

$$\Delta P = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_k^2\ L_k\right) = \frac{2}{\gamma A}\sum_{k=1}^{k=n}\left(I_a^2 + I_r^2\right)_k \cdot L_k$$

$$I_a = I\cos\varphi$$

$$I_r = I\sin\varphi$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$\overline{I} = I_a + jI_r = I\ \underline{/\varphi_k}$$

מפל מתח מרבי	–	ΔU	[V]
מפל מתח מרבי ממשי	–	ΔU_a	[V]
מפל מתח מרבי היגבי	–	ΔU_r	[V]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	–	X_o	$[\Omega / m]$
זרם בקטע k	–	I_k	[A]
אורך של קטע k	–	L_k	[m]
הזווית בין מתח לזרם בקטע k	–	φ_k	
מוליכות סגולית של המוליכים	–	γ	$[m / \Omega mm^2]$
שטח חתך של המוליכים	–	A	$[mm^2]$
הפסדי הספק מרביים	–	ΔP	[W]
הזרם הממשי בקטע k	–	I_a	[A]
הזרם ההיגבי בקטע k	–	I_r	[A]

המשך בעמוד 2

מתח חילופין תלת־מופעי

$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$
$\Delta U_r = \sqrt{3}\, X_o \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k\, L_k \sin\varphi_k\right)$
$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k\, L_k \cos\varphi_k\right)$
$\Delta P = \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_k^2\, L_k\right) = \frac{3}{\gamma A} \sum_{k=1}^{k=n} \left(I_a^2 + I_r^2\right)_k \cdot L_k$
$I_a = I\cos\varphi$
$I_r = I\sin\varphi$
$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$
$\overline{I} = I_a + j\,I_r = I\angle\varphi_k$

מפל מתח מרבי – ΔU [V]

מפל מתח מרבי ממשי – ΔU_a [V]

מפל מתח מרבי היגבי – ΔU_r [V]

היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד – X_o [Ω / m]

זרם בקטע k – I_k [A]

אורך של קטע k – L_k [m]

הזווית בין מתח לזרם בקטע k – φ_k

מוליכות סגולית של המוליכים – γ [m / Ωmm^2]

שטח חתך של המוליכים – A [mm^2]

הפסדי הספק מרביים – ΔP [W]

הזרם הממשי בקטע k – I_a [A]

הזרם ההיגבי בקטע k – I_r [A]

2. צפיפות זרם אחידה

$$\boxed{A_k = K \cdot I_k}$$

זרם ישר	$K = \frac{2\sum_{k=1}^{k=n} L_k}{\gamma \Delta U}$
זרם חילופין חד־מופעי	$K = \frac{2\sum_{k=1}^{k=n} \left(L_k \cos\varphi_k\right)}{\gamma \Delta U_a}$
זרם חילופין תלת־מופעי	$K = \frac{\sqrt{3}\sum_{k=1}^{k=n} \left(L_k \cos\varphi_k\right)}{\gamma \Delta U_a}$

שטח חתך בקטע k – A_k [mm^2]

זרם בקטע k – I_k [A]

אורך של קטע k – L_k [m]

מוליכות סגולית של המוליכים – γ [m / Ωmm^2]

מפל המתח המרבי – ΔU [V]

מפל המתח הממשי המרבי – ΔU_a [V]

הזווית בין מתח לזרם בקטע k – φ_k

המשך בעמוד 3

3. מינימום חומר

<u>זרם ישר</u>

$$K = \frac{2}{\gamma \Delta U} \sum_{k=1}^{k=n} \left(L_k \sqrt{I_k} \right)$$

$$A_k = K \sqrt{I_k}$$

שטח חתך בקטע k – A_k $[mm^2]$

זרם בקטע k – I_k $[A]$

מוליכות סגולית של המוליכים – γ $[m / \Omega mm^2]$

מפל המתח המרבי – ΔU $[V]$

אורך של קטע k – L_k $[m]$

<u>זרם חילופין חד־מופעי</u>

$$K = \frac{2}{\gamma \Delta U_a} \sum_{k=1}^{k=n} \left(L_k \sqrt{I_k \cos \varphi_k} \right)$$

$$A_k = K \sqrt{I_k \cos \varphi_k}$$

שטח חתך בקטע k – A_k $[mm^2]$

זרם בקטע k – I_k $[A]$

מוליכות סגולית של המוליכים – γ $[m / \Omega mm^2]$

מפל המתח הממשי המרבי – ΔU_a $[V]$

הזווית בין מתח לזרם בקטע k – φ_k

אורך של קטע k – L_k $[m]$

<u>זרם חילופין תלת־מופעי</u>

$$K = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \Delta U_a} \sum_{k=1}^{k=n} \left(L_k \sqrt{I_k \cos \varphi_k} \right)$$

$$A_k = K \sqrt{I_k \cos \varphi_k}$$

שטח חתך בקטע k – A_k $[mm^2]$

זרם בקטע k – I_k $[A]$

מוליכות סגולית של המוליכים – γ $[m / \Omega mm^2]$

מפל המתח הממשי המרבי – ΔU_a $[V]$

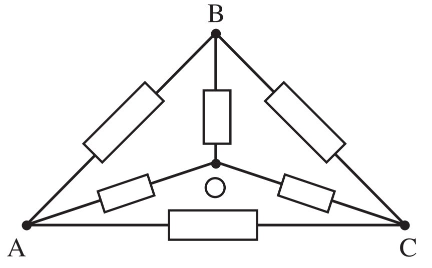
הזווית בין מתח לזרם בקטע k – φ_k

אורך של קטע k – L_k $[m]$

המשך בעמוד 4

4. חישובים ברשתות

הפיכת משולש לכוכב

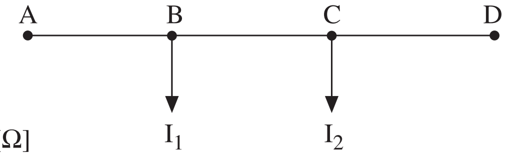


$$R_{OB} = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$R_{OC} = \frac{R_{BC} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

$$R_{OA} = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}$$

פירוק הזרמים והעברתם לנקודות חדשות



A, D – הנקודות שאליהן מעבירים את הזרמים

R [Ω] – התנגדות הקטע בין הנקודות המצוינות

$$I_{1 \to A} = I_1 \frac{R_{BD}}{R_{AD}} \qquad I_{1 \to D} = I_1 \frac{R_{AB}}{R_{AD}}$$

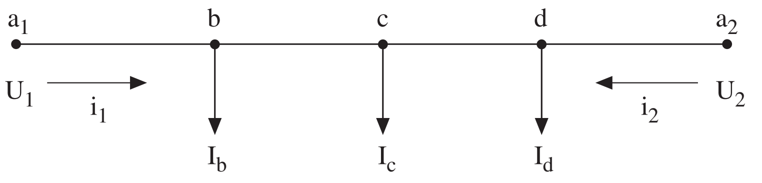
$$I_{2 \to A} = I_2 \frac{R_{CD}}{R_{AD}} \qquad I_{2 \to D} = I_2 \frac{R_{AC}}{R_{AD}}$$

הערה:

כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך אחיד לכל אורכם, ניתן להשתמש באורכים במקום בהתנגדויות בנוסחאות אלו.

המשך בעמוד 5

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים זהים, ושטח חתך אחיד של המוליכים



הזרמים המדומים:

$$\boxed{i_1 = \frac{I_b \cdot L_{ba_2} + I_c \cdot L_{ca_2} + I_d \cdot L_{da_2}}{L_{a_1a_2}}}$$

$$\boxed{i_2 = \frac{I_b \cdot L_{ba_1} + I_c \cdot L_{ca_1} + I_d \cdot L_{da_1}}{L_{a_1a_2}}}$$

הערות:

1. כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו חומר ושטח החתך שלהם אינו אחיד לכל אורכם, יש להשתמש בהתנגדויות במקום באורכים בנוסחאות לחישוב הזרמים המדומים.
2. במערכת זרם חילופין יש לבצע חישובים של זרם מדומה, זרם אקטיבי וזרם ריאקטיבי.

רשת בעלת זינה משני כיוונים במתחים שונים בעלי מופעים זהים

הזרם המשלים:

זרם ישר/זרם חילופין חד־מופעי

$$\boxed{I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot R_{a_1a_2}}}$$

(כאשר: $U_1 > U_2$)

זרם חילופין תלת־מופעי

$$\boxed{I_{\text{משלים}} = \frac{U_1 - U_2}{\sqrt{3} \cdot R_{a_1a_2}}}$$

(כאשר: $U_1 > U_2$)

הזרם האמיתי:

$$\boxed{I_1 = i_1 + I_{\text{משלים}}}$$

$$\boxed{I_2 = i_2 - I_{\text{משלים}}}$$

המשך בעמוד 6

5. פרמטרים של קווי הספק

$$\Delta P = 3I^2 R_o L$$

$$\Delta Q_L = 3I^2 X_o L$$

$$X_o = 0.144 \log \frac{D_m}{r} + 0.016$$

$$\Delta Q_C = \sqrt{3}\, I_C\, U$$

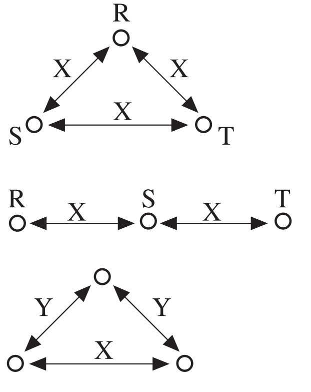
$$I_C = \frac{U}{\sqrt{3}} C_o\, L\, \omega \cdot 10^{-6}$$

עבור: $f = 50\,\text{Hz}$

$$I_C = 0.181\, U\, C_o\, L \cdot 10^{-3}$$

$$C_o = \frac{0.0242}{\log \frac{D_m}{r}}$$

הפסד הספק אקטיבי	–	ΔP	[W]
הפסד הספק היגבי (השראותי)	–	ΔQ_L	[VAr]
התנגדות הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	–	R_o	[Ω / km]
היגב הקו ליחידת אורך עבור מוליך אחד	–	X_o	[Ω / km]
אורך הקו	–	L	[km]
המרחק הממוצע בין המוליכים	–	D_m	[cm]
רדיוס המוליך	–	r	[cm]
הפסד הספק היגבי (קיבולי)	–	ΔQ_C	[VAr]
זרם הזליגה של הקו	–	I_C	[A]
קיבול קו עילי ליחידת אורך עבור מוליך אחד	–	C_o	[μF / km]
המתח השלוב של הרשת	–	U	[V]



$$D_m = X$$

$$D_m = X\sqrt[3]{2}$$

$$D_m = \sqrt[3]{XY^2}$$

המרחק בין המוליכים	–	X	[cm]
המרחק הממוצע בין המוליכים	–	D_m	[cm]

המשך בעמוד 7

6. פרמטרים של שנאים

$$R_T = \Delta P_{Cu} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}$$

$$R_T = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$X_T = \frac{U_{x\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$U_{x\%} = \sqrt{U_{k\%}^2 - U_{r\%}^2}$$

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2}$$

$$Y_T = \frac{I_0}{U_n} = \frac{I_{0\%} \cdot S_n}{100 \cdot U_n^2}$$

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$$

$[\Omega]$ R_T – התנגדות השנאי

$[W]$ ΔP_{Cu} – הפסדי קצר

$[V]$ U_n – מתח נקוב של השנאי

$[VA]$ S_n – הפסק נקוב של השנאי

$U_{r\%}$ – הרכיב הממשי של מתח הקצר (באחוזים)

$U_{x\%}$ – הרכיב ההיגבי של מתח הקצר (באחוזים)

$U_{k\%}$ – מתח הקצר (באחוזים)

$[\Omega]$ X_T – היגב השנאי

$[\Omega]$ Z_T – עכבת השנאי

$[S]$ G_T – מוליכות השנאי

$[S]$ Y_T – מתירות השנאי

$[S]$ B_T – מניחות השנאי

$[W]$ ΔP_{Fe} – הפסדי ריקם

$[A]$ I_0 – זרם ריקם

$I_{0\%}$ – זרם ריקם (באחוזים)

המשך בעמוד 8

כבלים מותקנים בתעלה רחבה, על מגש מחורר או צמודים לקיר – בידוד 90 °C במעגל תלת־מופעי

מוליכים מנחושת		מוליכים מאלומיניום	
חתך **S** **(ממ"ר)**	**זרם מתמיד מרבי** I_z **(אמפר)**	**חתך** **S** **(ממ"ר)**	**זרם מתמיד מרבי** I_z **(אמפר)**
1.5	20		
2.5	28		
4	36		
6	41	6	36
10	66	10	50
16	88	16	68
25	118	25	92
35	145	35	113
50	175	50	137
70	223	70	174
95	270	95	211
120	313	120	244

טמפרטורה אופפת של הסביבה: 35 °C

1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של הסביבה

טמפרטורה אופפת של הסביבה (°C)									
10	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**
1.21	**1.17**	**1.13**	**1.09**	**1.04**	**1.00**	**0.95**	**0.90**	**0.85**	**0.80**

2. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים רב־גידיים ללא רווח ביניהם

(1) התקנה בשכבה אחת:

מספר הכבלים	**2**	**3**	**4**	**6**	**9**
המקדם	**0.80**	**0.73**	**0.70**	**0.68**	**0.66**

(2) התקנה בשכבות אחדות או במקובץ:

מספר הכבלים	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**	**12**
המקדם	**0.80**	**0.70**	**0.65**	**0.60**	**0.57**	**0.52**	**0.48**	**0.45**

המשך בעמוד 9

כבלים טמונים במישרין באדמה עם כיסוי מגן – בידוד 90 °C
כבל רב־גידי במעגל תלת־מופעי

מוליכים מנחושת		מוליכים מאלומיניום	
חתך S (ממ"ר)	זרם מתמיד מרבי I_z (אמפר)	חתך S (ממ"ר)	זרם מתמיד I_z (אמפר)
1.5	28		
2.5	36		
4	44		
6	56	6	43
10	76	10	59
16	97	16	76
25	124	25	94
35	148	35	115
50	179	50	138
70	220	70	171
95	265	95	206
120	303	120	235
150	339	150	263
185	382	185	298
240	442	240	345

טמפרטורה אופפת של האדמה: 30 °C

1. מקדם תיקון עבור טמפרטורה אופפת שונה של האדמה

טמפרטורה אופפת של האדמה (°C)									
10	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**
1.15	**1.12**	**1.08**	**1.04**	**1.00**	**0.96**	**0.91**	**0.87**	**0.82**	**0.77**

2. מקדם תיקון עבור התקנת כבלים אחדים באדמה

		מספר המעגלים		
		2	**3**	**4**
אופן התקנת המעגלים	**מעגלים צמודים**	**0.78**	**0.66**	**0.59**
	מעגלים שהמרחק המזערי בין המעטים שלהם 7 ס"מ	**0.83**	**0.72**	**0.67**

המשך בעמוד 10

נתונים של מוליכי Al – Fe שזורים וגלויים בטמפרטורת סביבה 20 °C

I	D_m [cm]									R_0	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
[A]	X_0 [Ω/km]									[Ω/km]	[mm]	[mm^2]
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

נתונים של מוליכי חמרן ונחושת שזורים וגלויים בטמפרטורת סביבה 20 °C

Al		Cu		D_m [cm]									קוטר	שטח חתך
I	R_0	I	R_0	56	100	200	300	400	500	600	700	1000		
[A]	[Ω/km]	[A]	[Ω/km]	X_0 [Ω/km]									[mm]	[mm^2]
—	—	70	1.786	0.368	0.403	0.446	0.472	0.490	0.504	0.515	0.525	0.547	4.1	10
92	1.805	115	1.123	0.354	0.389	0.433	0.458	0.476	0.490	0.502	0.511	0.533	5.1	16
121	1.185	151	0.738	0.341	0.376	0.420	0.445	0.463	0.477	0.488	0.498	0.520	6.3	25
149	0.845	174	0.525	0.330	0.365	0.409	0.434	0.452	0.466	0.477	0.487	0.509	7.5	35
187	0.587	234	0.364	0.319	0.354	0.397	0.423	0.441	0.455	0.466	0.476	0.498	9.0	50
226	0.435	282	0.271	0.309	0.344	0.388	0.413	0.431	0.445	0.456	0.466	0.488	10.5	70
282	0.309	357	0.192	0.298	0.333	0.377	0.402	0.420	0.434	0.445	0.455	0.477	12.5	95
329	0.245	411	0.153	0.291	0.326	0.370	0.395	0.413	0.427	0.438	0.448	0.470	14.0	120
382	0.196	477	0.122	0.283	0.319	0.362	0.387	0.405	0.419	0.431	0.440	0.463	15.8	150
435	0.158	544	0.098	0.277	0.312	0.356	0.381	0.399	0.413	0.424	0.434	0.456	17.5	185
502	0.126	630	0.078	0.270	0.305	0.349	0.374	0.392	0.406	0.417	0.427	0.449	19.6	240
513	0.118	641	0.074	0.268	0.303	0.346	0.372	0.390	0.404	0.415	0.425	0.447	20.3	240
598	0.096	747	0.060	0.261	0.297	0.340	0.365	0.383	0.397	0.409	0.418	0.441	22.5	300

המוליכות הסגולית – γ [m / Ωmm^2]

המשקל הסגולי – g [g / cm^3]

	חומרים	
	נחושת	חמרן
γ	57	35
g	8.9	2.7

המשך בעמוד 11

זרם מרבי (באמפר) בכבלים, במתח נמוך עד 1000 V
(טמפרטורת הסביבה: 20 °C)

חתך (ממ"ר)	כבלי נחושת NYY ; NYFGBY ; NYCY		כבלי חמרן NAYY ; NAYFGBY ; NAYCY	
	באוויר	באדמה	באוויר	באדמה
3×1.5	20	25	—	—
3×2.5	28	35	—	—
3×4	36	45	29	36
3×6	48	60	38	48
3×10	64	80	51	64
3×16	88	110	70	88
3×25	110	135	88	110
3×35	130	165	105	130
3×50	160	200	130	160
3×70	195	245	155	195
3×95	235	295	190	235
3×120	270	340	215	270
3×150	310	390	250	310
3×185	355	445	285	355
3×240	410	515	330	410

המשך בעמוד 12

7. ויסות מתח

$$\delta U_K = \Sigma\left(U_T\right) - \Sigma\left(\Delta U_{AK}\right)$$

$$\delta U_{min} < \delta U_K < \delta U_{max}$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}$$

$$\Delta U_T\% = \frac{\sqrt{3}\left(I' R_T + I'' X_T\right)}{U_n} \cdot 100$$

$$\Delta U_L\% = \frac{\sqrt{3}\left(I' R_L + I'' X_L\right)}{U_n} \cdot 100$$

$$I' = I\cos\varphi \quad ; \quad I'' = I\sin\varphi$$

$$K_x = \frac{U_1 \pm n \cdot a}{U_2}$$

δU_K [%] – הפרשי מתח בנקודה K

U_T [%] – תוספות של מתח בשנאים

ΔU_{AK}[%] – מפלי מתח מהמקור עד לנקודה K

δU_{min}[%] – הפרשי מתח מזעריים

δU_{max}[%] – הפרשי מתח מרביים

U_n [V] – מתח הייחוס

ΔU [V] – מפל מתח

P [W] – הספק פעיל של העומס

R [Ω] – התנגדות

Q [VAr] – הספק עיוור של העומס

X [Ω] – היגב

ΔU_T [%] – מפל המתח על השנאי

ΔU_L [%] – מפל המתח על הקו

I [A] – זרם הרשת

R_T [Ω] – התנגדות השנאי (למופע)

X_T [Ω] – ההיגב ההשראותי של שנאי (למופע)

R_L [Ω] – ההתנגדות של מוליך אחד

X_L [Ω] – ההיגב ההשראותי של מוליך אחד

K_x – יחס השנאה

U_1 [V] – מתח בסליל הראשוני

U_2 [V] – מתח בסליל השניוני

n – מספר דרגות ויסות

a – שיעור ויסות המתח (באחוזים) בין דרגה לדרגה

המשך בעמוד 13

8. מתח קורונה

$$U_{KR} = \sqrt{3} \cdot 21.1 \cdot r \cdot 2.3 \log \frac{D_m}{r} m_1 \, m_2 \, \delta$$

$$\delta = \frac{3.92 \cdot b}{273 + t}$$

שינויים של מתח קורונה מופעי	T	S	R
	o	o	o
	+6%	–4%	+6%

עבור: $f = 50$ Hz

$$\Delta P_{OKR} = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D_m}} \left(U_O - U_{OKR}\right)^2$$

- U_{KR} [kV] – מתח קורונה שלוב בסידור של מוליכים במשולש
- b [cm Hg] – לחץ האוויר
- t [°C] – טמפרטורת הסביבה
- D_m [cm] – המרחק הממוצע בין המוליכים
- r [cm] – רדיוס המוליך
- m_1 – מקדם מבנה המוליך
  - * מלא: 1
  - * שזור: 0.7 – 0.9
- m_2 – מקדם מזג האוויר
  - * יבש: 1
  - * רטוב: 0.8
- U_O [kV] – מתח מופעי של הרשת
- U_{OKR} [kV] – מתח קורונה מופעי
- ΔP_{OKR} [kW / km] – הפסדי קורונה במופע אחד

9. נקודת האפס ברשת חשמל

$$I_C = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{ph} = 3 \cdot \omega \cdot C_o \cdot L \cdot U_{ph}$$

$$L^* = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C}$$

- I_C [A] – זרם תקלה
- ω $\left[\frac{rad}{sec}\right]$ – התדר הזוויתי של הרשת
- C [F] – קיבול הקו
- C_o [F / km] – קיבול הקו ליחידת אורך
- L [km] – אורך הקו
- U_{ph} [V] — מתח קווי
- L^* [H] – השראות סליל פטרסון

המשך בעמוד 14

10. צפיפות זרם כלכלית (מערכת תלת־מופעית)

$$U = \frac{\sqrt{3}\ j\,L \cdot 100}{\Delta P_{\%}\ \gamma \cos\varphi}$$

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3}\ U_n \cos\varphi}$$

$$A = \frac{I_{max}}{j}$$

המתח המומלץ – U [kV]

צפיפות זרם כלכלית – j [A / mm^2]

אורך הקו – L [km]

הפסדי הספק מרביים – $\Delta P_{\%}$

מוליכות סגולית – γ [$m / \Omega mm^2$]

הזווית בין מתח לזרם בקו – φ

הזרם המרבי – I_{max} [A]

ההספק המרבי – P_{max} [kW]

המתח הנקוב – U_n [kV]

שטח חתך מומלץ – A [mm^2]

$$W_{ש} = \int_0^{8760} P\,dt$$

$$P_{av} = \frac{W_{ש}}{8760}$$

$$T_v = \frac{W_{ש}}{P_{max}} = \frac{P_{av} \cdot 8760}{P_{max}} = \frac{1}{P_{max}} \int_0^{8760} P\,dt$$

אנרגיה שנתית – $W_{ש}$ [kWh]

הספק רגעי – P [kW]

הספק ממוצע – P_{av} [kW]

זמן שימוש בהספק מרבי – T_v [h]

T_v [h]	j [A / mm^2]			
	כבלים		קווים עיליים	
	Cu	Al	Cu	Al–Fe
$T_v > 5000$ h	2	1.3	1.25	0.75
3000 h $< T_v <$ 5000 h	2.25	1.5	1.75	1
$T_v < 3000$ h	2.65	1.65	2.5	1.5

המשך בעמוד 15

חישוב כלכלי של שטח החתך המומלץ:

$$\boxed{C_1 = (a \cdot A + b) \cdot L \cdot p}$$

ההשקעה לשנה בבניית רשת החשמל – C_1 [ש"ח]

חלק ההשקעה התלוי בשטח החתך של המוליכים – a $\left[\frac{\text{ש"ח}}{km \cdot mm^2}\right]$

שטח החתך של המוליכים – A $[mm^2]$

חלק ההשקעה שאינו תלוי בשטח החתך של המוליכים – b $\left[\frac{\text{ש"ח}}{km}\right]$

אורך הקו – L $[km]$

החזר שנתי של ההוצאות, ריבית ופחת – p $\left[\frac{\%}{100}\right]$

$$\boxed{C_2 = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot R \cdot T_S \cdot c = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot \frac{\rho L}{A} \cdot T_S \cdot c}$$

ההוצאות לכיסוי הפסדי ההספק ברשת – C_2 [ש"ח]

זרם העומס העובר בקו – I_{max} $[A]$

התנגדות המוליכים – R $[k\Omega]$

זמן ההפסדים המרביים ברשת – T_S $[h]$

$$\boxed{T_S = \frac{\int_0^t I^2\,dt}{I_{max}^2} = \frac{\Sigma\left(I^2 \cdot t\right)}{I_{max}^2} = \frac{\Sigma\left(S^2 \cdot t\right)}{S_{max}^2}}$$

מחיר האנרגיה החשמלית – c $\left[\frac{\text{ש"ח}}{kWh}\right]$

התנגדות סגולית של המוליכים – ρ $\left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}\right]$

נוסחת קלווין:

$$\boxed{A = I_{max}\sqrt{\frac{3 \cdot \rho \cdot T_S \cdot c}{a \cdot p}} = I_{max}\sqrt{\frac{3 \cdot T_S \cdot c}{\gamma \cdot a \cdot p}}}$$

מוליכות סגולית של המוליכים – γ $\left[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}\right]$

המשך בעמוד 16

11. הפסדי הספק והפסדי אנרגיה ברשת חשמל

<u>הפסדי אנרגיה ברשת חשמל:</u>

$\boxed{\Delta W = \Delta P \cdot t}$ (כאשר העומס קבוע)

$\boxed{\Delta W = \Delta P_{max} \cdot T_S}$ (כאשר העומס משתנה)

$[kW]$ ΔP_{max} – הפסדי הספק בעומס מרבי

$[h]$ T_S – זמן ההפסדים המרביים ברשת

<u>הפסדי אנרגיה בשנאי:</u>

$$\boxed{\Delta W = \Delta P_o \cdot t + \beta_{max}^2 \cdot \Delta P_{Cu_n} \cdot T_S}$$

$$\boxed{\beta = \frac{S}{S_n}}$$

$[kW]$ ΔP_o – הפסדי הספק בריקם (הפסדי ברזל)

$[kW]$ ΔP_{Cu_n} – הפסדי הספק בקצר (הפסדי נחושת)

β – מקדם ההעמסה של השנאי

כאשר N שנאים זהים מחוברים זה לזה במקביל:

$$\boxed{\Delta W = N \cdot \Delta P_o \cdot t + \frac{\beta_{max}^2}{N} \cdot \Delta P_{Cu_n} \cdot T_S}$$

N – מספר השנאים

<u>העמסה אופטימלית של שנאי:</u>

$$\boxed{S_{max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o}{\Delta P_{Cu_n}}}}$$ (מבחינת חיסכון בהפסדי הספק)

$$\boxed{S_{max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_o \cdot t}{\Delta P_{Cu_n} \cdot T_S}}}$$ (מבחינת חיסכון בהפסדי אנרגיה)

ההספק האופטימלי להפעלת שנאי הנוסף ל־N שנאים:

$$\boxed{S_{max} = S_n \cdot \sqrt{\frac{N \cdot (N+1) \cdot \Delta P_o}{\Delta P_{Cu_n}}}}$$ (מבחינת חיסכון בהפסדי הספק)

בהצלחה!

מדינת ישראל
משרד החינוך

אין להעביר את הנוסחאון לנבחן אחר

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תשע"ה, 2015
נספח לשאלון: 733913

מקום למדבקת נבחן

נוסחאון במכונות חשמל והינע לכיתה י"ד

(22 עמודים)

א. מכונה סינכרונית

1. מחולל סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

$$\boxed{\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph}\left(R_a + j\,X_s\right)}$$

$$\boxed{\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} \cdot j\,X_s}$$

(בהזנחת התנגדות העוגן)

[V] E_{ph} – כא"מ מופעי
[V] U_{ph} – מתח מופעי
[A] I_{ph} – זרם מופעי בסטטור
[Ω] R_a – התנגדות העוגן למופע אחד
[Ω] X_s – היגב סינכרוני למופע אחד

חישוב היגב סינכרוני

$$\boxed{X_s \approx \frac{E_{phk}}{I_{phk}}}$$

$$\boxed{\frac{E_{phk}}{E_{pho}} = \frac{I_{fk}}{I_{fo}}}$$

(בהזנחת R_a ובעקום מיגנוט לינארי)

[V] E_{pho} – כא"מ מופעי בניסוי בריקם
[V] E_{phk} – כא"מ מופעי בניסוי בקצר
[A] I_{phk} – זרם מופעי בסטטור בניסוי בקצר
[A] I_{fo} – זרם עירור בניסוי בריקם
[A] I_{fk} – זרם עירור בניסוי בקצר

המשך בעמוד 2

עבור עומס התנגדותי $(\varphi=0°)$:

$$E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(I_{ph} \cdot X_s\right)^2}$$

$$\tan\Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} + I_{ph} \cdot R_a}$$

φ – הזווית בין הזרם המופעי למתח המופעי

Ψ – הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי

Θ – הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי

עבור עומס השראותי $(0° < \varphi \leq 90°)$:

$$E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} \cdot \cos\varphi + I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(U_{ph} \cdot \sin\varphi + I_{ph} \cdot X_s\right)^2}$$

$$\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin\varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos\varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \Psi - \varphi$$

עבור עומס קיבולי $(-90° \leq \varphi < 0°)$:

$$E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} \cdot \cos\varphi + I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(U_{ph} \cdot \sin\varphi - I_{ph} \cdot X_s\right)^2}$$

$$\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin\varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos\varphi + I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

המשך בעמוד 3

2. מנוע סינכרוני

משוואת מתחים וקטורית

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph}\left(R_a + jX_s\right)$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} \cdot jX_s$$ (בהזנחת התנגדות העוגן)

עבור עומס התנגדותי $(\varphi = 0°)$:

$$E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(I_{ph} \cdot X_s\right)^2}$$

$$\tan\Theta = \frac{I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} - I_{ph} \cdot R_a}$$

עבור עומס השראותי $(0° < \varphi \leq 90°)$:

$$E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} \cdot \cos\varphi - I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(U_{ph} \cdot \sin\varphi - I_{ph} \cdot X_s\right)^2}$$

$$\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin\varphi - I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos\varphi - I_{ph} \cdot R_a}$$

$$\Theta = \varphi \pm \Psi$$

המשך בעמוד 4

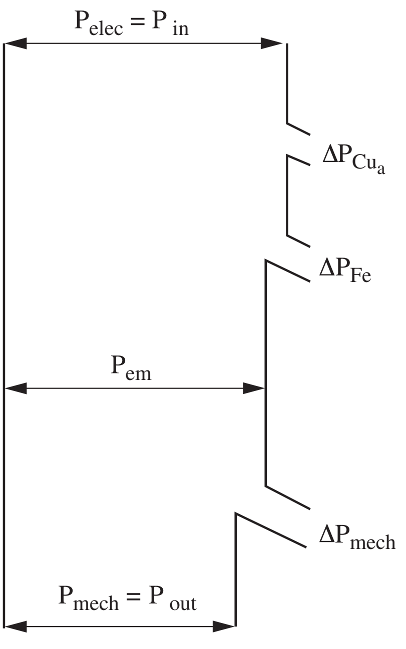
עבור עומס קיבולי $(-90° \le \varphi < 0°)$:

$$\boxed{E_{ph} = \sqrt{\left(U_{ph} \cdot \cos\varphi - I_{ph} \cdot R_a\right)^2 + \left(U_{ph} \cdot \sin\varphi + I_{ph} \cdot X_s\right)^2}}$$

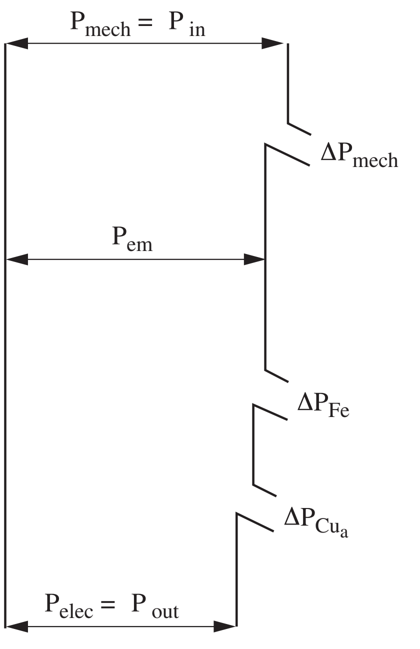
$$\boxed{\tan\Psi = \frac{U_{ph} \cdot \sin\varphi + I_{ph} \cdot X_s}{U_{ph} \cdot \cos\varphi - I_{ph} \cdot R_a}}$$

$$\boxed{\Theta = \Psi - \varphi}$$

הספקים ואיבודי הספק במכונה סינכרונית:



מנוע



מחולל

המשך בעמוד 5

הספק מכני	–	P_{mech}	[W]
מומנט	–	M	[Nm]
מהירות זוויתית סינכרונית	–	ω_s	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
מהירות סינכרונית	–	n_s	[rpm]
תדירות	–	f	[Hz]
מס' זוגות קטבים	–	p	
הספק חשמלי	–	P_{elec}	[W]
גורם הספק	–	$\cos\varphi$	
כא"מ מופעי	–	E_{ph}	[V]
היגב סינכרוני מופעי	–	X_s	[Ω]
הזווית בין הזרם המופעי לכא"מ המופעי	–	ψ	
הזווית בין המתח המופעי לכא"מ המופעי	–	Θ	
הספק עיוור	–	Q	[VAr]
הספק אלקטרו־מגנטי	–	P_{em}	[W]
הפסדי נחושת בסטטור	–	ΔP_{Cu_a}	[W]
הפסדי נחושת בסליל (DC) ברוטור	–	ΔP_{Cu_e}	[W]
הפסדים מגנטיים בליבת הברזל	–	ΔP_{Fe}	[W]
הפסדים מכניים	–	ΔP_{mech}	[W]
נצילות המכונה	–	η	[%]
הספק מוצא	–	P_{out}	[W]
הספק מבוא	–	P_{in}	[W]

$$\boxed{P_{mech} = M \cdot \omega_s = \frac{M \cdot n_s}{9.55}}$$

$$\boxed{\omega_s = \frac{2\,\pi\, n_s}{60}}$$

$$\boxed{n_s = \frac{60 \cdot f}{p}}$$

$$\boxed{P_{elec} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos\varphi}$$

$$\boxed{P_{elec} = \frac{3 \cdot E_{ph} \cdot U_{ph}}{X_s} \cdot \sin\Theta}$$

$$\boxed{Q = \frac{3}{X_s}\left[U_{ph} \cdot E_{ph} \cdot \cos\Theta - U_{ph}^2\right]}$$

$$\boxed{P_{em} = 3 \cdot E_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos\psi}$$

$$\boxed{\Delta P_{Cu_a} = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R_a}$$

$$\boxed{\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100}$$

המשך בעמוד 6

ב. שיקולים ושיטות לבחירת מנועים חשמליים

מיון חומרי בידוד על־פי טמפרטורה מרבית מותרת:

קבוצת חומר הבידוד	Y	A	E	B	F	H	C
טמפרטורת סביבה מרבית (°C)	90	105	120	130	155	180	>180

$$\Delta T = \Delta T_0 + \left(\Delta T_\infty - \Delta T_0\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$\Delta T = \Delta T_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$ (בהנחת $\Delta T_0 = 0$)

$$\alpha = \alpha_o\left(1 - K\cdot\sqrt{V}\right)$$

$$\tau = \frac{G\cdot C}{\alpha\cdot A_T}$$

$$\Delta T_\infty = \frac{\Delta P}{\alpha\cdot A_T}$$

$$\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$$

ΔT_0 – $[°C]$ – הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן $t = 0$

ΔT_∞ – $[°C]$ – הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן $t = \infty$

ΔT – $[°C]$ – הפרש הטמפרטורה בין גוף המנוע לסביבה בזמן t כלשהו

t – $[sec]$ – זמן

τ – $[sec]$ – קבוע זמן חימום

α – $\left[\frac{W}{m^2\cdot °C}\right]$ – מקדם פיזור החום באוויר זורם

α_o – $\left[\frac{W}{m^2\cdot °C}\right]$ – מקדם פיזור החום באוויר נח

V – $\left[\frac{m}{sec}\right]$ – מהירות האוויר

K – מקדם האיוורור

A_T – $[m^2]$ – שטח פיזור החום

G – $[kg]$ – משקל

C – $\left[\frac{W\cdot sec}{kg\cdot °C}\right]$ – חום סגולי

ΔP – $[W]$ – סכום הפסדי ההספק של המנוע

P_n – $[W]$ – הספק נקוב של המנוע

η – נצילות המנוע

המשך בעמוד 7

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות (ש.ה.):

תנאי פעולה: $t_w \le 2 \cdot \tau$

$t_o \ge 5 \cdot \tau$

$$P_n = \frac{P_x}{\sqrt{\left(\frac{1}{1-e^{-\frac{t_w}{\tau}}}\right)\frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}}$$

$$P_n = P_x\left(1-e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)$$ (עבור נצילות קבועה)

$$P_x = M \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

[sec]	t_w	–	זמן עבודה
[sec]	τ	–	קבוע זמן תרמי
[W]	P_n	–	הספק נקוב של המנוע בעבודה ממושכת
[W]	P_x	–	הספק העומס
$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	ω	–	מהירות זוויתית
[rpm]	n	–	מהירות סיבוב
	K_1	–	קבוע ההפסדים הקבועים
	K_2	–	קבוע ההפסדים המשתנים

בחירת הספק מנוע לעבודה עם הפסקות מחזוריות (ש.ה.מ.):

$$P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{K_2 \cdot \left(1-e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)}{1-e^{-\left(t_w+t_o\right)/\tau} - K_1 \cdot \left(1-e^{-\frac{t_w}{\tau}}\right)}}$$

$$P_n = P_x \cdot \sqrt{\frac{t_w}{t_w+t_o}}$$ (כאשר $t_w << \tau$)

המשך בעמוד 8

בחירת הספק מנוע בעומס משתנה בעבודה ממושכת:

שיטת ההפסדים הממוצעים

$$\boxed{\Delta P_{av} = \frac{\Sigma\left(\Delta P_i \cdot t_i\right)}{\beta\left(t_s + t_b\right) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}}$$

התנאי לבחירת מנוע: $\boxed{\Delta P_{av} \le \Delta P_n}$

שיטת הזרם השקול

$$\boxed{I_{eq} = \sqrt{\frac{\Sigma\left(I_i^2 \cdot t_i\right)}{\beta\left(t_s + t_b\right) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}}}$$

שיטת המומנט השקול

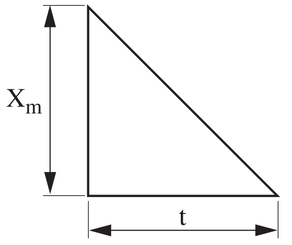
$$\boxed{M_{eq} = \sqrt{\frac{\Sigma\left(M_i^2 \cdot t_i\right)}{\beta\left(t_s + t_b\right) + \alpha \cdot t_r + \Sigma t_w}}}$$

[W]	ΔP_{av}	– הפסדי הספק ממוצעים
[W]	ΔP_i	– הפסדי הספק בקטע i
[sec]	t_i	– זמן בקטע i
[sec]	t_s	– זמן התנעה (start)
[sec]	t_b	– זמן בלימה (brake)
[sec]	t_r	– זמן הפסקה (מנוחה) (rest)
[sec]	t_w	– זמן בעומס כלשהו במצב שאינו בלימה, התנעה או הפסקה
[A]	I_{eq}	– הזרם השקול
[A]	I_i	– זרם המנוע בקטע i

המשך בעמוד 9

מציאת זרם/מומנט שקול

משולש:

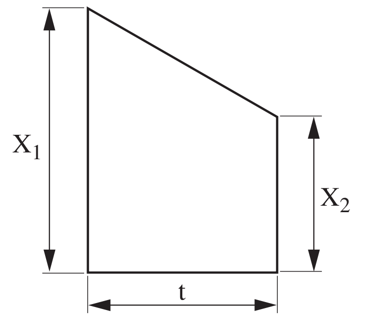


$$X_{eq} = \frac{X_m}{\sqrt{3}}$$

X_{eq} – זרם/מומנט שקול

X_m – זרם/מומנט מרבי

טרפז:



$$X_{eq} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_1X_2}{3}}$$

X_1 – זרם/מומנט מרבי

X_2 – זרם/מומנט מזערי

המשך בעמוד 10

קביעת הספק מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה לא תקנית:

$$P_T = P_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{\infty T}}{\Delta T_\infty} - K_1\right) \cdot \frac{1}{K_2}}$$

[W] P_T – הספק העמסה מותר

[W] P_n – הספק נומינלי

[°C] $\Delta T_{\infty T}$ – הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה לא תקנית

[°C] ΔT_∞ – הפרש הטמפרטורה בין המנוע לסביבה בטמפרטורה תקנית

K_1 – קבוע ההפסדים הקבועים

K_2 – קבוע ההפסדים המשתנים

ג. מנוע לזרם ישר

כוח אלקטרו־מניע:

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot n$$

$$K_e = \frac{z \cdot p}{60 \cdot a} \qquad K_m = \frac{z \cdot p}{2\pi \cdot a}$$

(ליפוף גלי פשוט) $a = 1$

(ליפוף עניבה פשוט) $a = p$

$$\frac{K_e}{K_m} = \frac{2\,\pi}{60} = 0.1047$$

[V] E – כוח אלקטרו־מניע

z – מספר המוליכים ברוטור

p – מספר זוגות הקטבים

a – מספר זוגות הענפים המקבילים ברוטור

המשך בעמוד 11

מומנטים:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_{em}}{n} = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = 9.55 \cdot \frac{P_n}{n}$$

$$\Delta M_o = M_{em} - M_n$$

[Nm]	M_{em}	מומנט אלקטרו־מגנטי –
[Nm]	M_n	מומנט נומינלי –
[Nm]	ΔM_o	איבודי מומנט בריקם –
$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	ω	מהירות זוויתית –
[rpm]	n	מהירות סיבוב של הרוטור –

הספקים:

$$P_{in} = U \cdot I \qquad P_{em} = E \cdot I_a$$

$$P_n = M_n \cdot \omega \qquad \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\eta = \frac{P_n}{P_{in}}$$

[A]	I_a	עוצמת הזרם ברוטור –
[W]	P_{in}	הספק חשמלי (מושקע) –
[W]	P_{em}	הספק אלקטרו־מגנטי –
[W]	P_n	הספק נומינלי (מופק) –
	η	נצילות המנוע –

איבודי הספק:

$$\Delta P_{Cu_a} = I_a^2 \cdot R_a$$

$$\Delta P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e$$

$$\Delta P_{Cu_s} = I_s^2 \cdot R_s$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_{em} - P_n$$

[W]	ΔP_{Cu_a}	איבודי הספק ברוטור –
[W]	ΔP_{Cu_e}	איבודי הספק בסליל העירור המקבילי –
[W]	ΔP_{Cu_s}	איבודי הספק בסליל העירור הטורי –
[W]	ΔP_{Fe}	איבודי הספק בברזל –
[W]	ΔP_{mech}	איבודי הספק מכניים –
[Ω]	R_a	התנגדות סליל העוגן –
[Ω]	R_e	התנגדות סליל העירור המקבילי –
[Ω]	R_s	התנגדות סליל העירור הטורי –

המשך בעמוד 12

סוג עירור	זרם העוגן	זרם העירור	כ.א.מ.	כ.מ.מ.
טורי	$I = I_a = I_e$		$E = U - I(R_a + R_s)$	$NI = N_s \cdot I$
זר	$I_a = I$	$I_e = \frac{U_e}{R_e + R_{re}}$	$E = U - I_a \cdot R_a$	$NI = N_e \cdot I_e$
מקבילי	$I_a = I - I_e$	$I_e = \frac{U}{R_e + R_{re}}$		
מעורב ארוך			$E = U - I_a(R_a + R_s)$	(*) $NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I_a$
מעורב קצר			$E = U - I \cdot R_s - I_a \cdot R_a$	(*) $NI = N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I$

(*) **הערה:**

הסימן (+) מתייחס לעירור מעורב מתוסף

הסימן (-) מתייחס לעירור מעורב מתחסר

- [A] I_a – עוצמת הזרם ברוטור
- [A] I – עוצמת הזרם הנצרך על־ידי המנוע
- [A] I_e – עוצמת הזרם בסליל העירור
- [V] E – כוח אלקטרו־מניע
- [V] U – מתח
- [V] U_e – מתח העירור
- [Ω] R_a – התנגדות סליל העוגן
- [Ω] R_e – התנגדות סליל העירור המקבילי
- [Ω] R_{re} – התנגדות נוספת במעגל העירור
- [AT] NI – כוח מגנטו־מניע
- [T] N_s – מספר הכריכות בסליל העירור הטורי
- [T] N_e – מספר הכריכות בסליל העירור המקבילי

המשך בעמוד 13

ויסות מהירות במנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/נפרד

הכנסת נגד טורי למעגל העוגן:

$$n = \frac{E}{K_e\Phi} \qquad n_o = \frac{U}{K_e\Phi}$$

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_x)}{K_e\Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e\Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_x}{(K_e\Phi)^2}$$

מהירות סיבוב	–	n	[rpm]
מהירות סיבוב בריקם	–	n_o	[rpm]
התנגדות נוספת במעגל הרוטור	–	R_x	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	–	R_a	[Ω]
שטף מגנטי	–	Φ	[Wb]
מתח	–	U	[V]
כוח אלקטרו־מניע	–	E	[V]
מספר כריכות בסליל העירור	–	N_e	[T]
מומנט אלקטרו־מגנטי	–	M_{em}	[Nm]

הכנסת נגד טורי למעגל העירור:

$$n = \frac{E}{K_e\Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_e\Phi}$$

(עבור מעגל מגנטי בתחום הלינארי)

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{N_e \cdot I_{e_1}}{N_e \cdot I_{e_2}}$$

שינוי מתח העוגן באמצעות בקרת מחזור הפעולה (Duty Cycle):

$$n == \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{K_e\Phi} = \frac{U \cdot D - I_a \cdot R_a}{K_e\Phi}$$

$$n == \frac{U_a}{K_e\Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e\Phi)^2}$$

$$n == \frac{U_a \cdot D}{K_e\Phi} - \frac{M_{em} \cdot R_a}{9.55 \cdot (K_e\Phi)^2}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

מתח	–	U	[V]
מתח הרוטור השקול	–	U_a	[V]
מחזור הפעולה	–	D	
זמן פעולה	–	T_{on}	[sec]
זמן הפסקה	–	T_{off}	[sec]

המשך בעמוד 14

ויסות מהירות של מנוע לזרם ישר בעירור מעורב

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi}$$

הכנסת נגד למעגל הרוטור:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s + R_x)}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s + R_x}{(K_e \Phi)^2}$$

הכנסת נגד למעגל העירור:

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s}{(K_e \Phi)^2}$$

(עבור מעגל מגנטי בתחום הלינארי)

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{(NI)_1}{(NI)_2}$$

שינוי מתח העוגן באמצעות בקרת מחזור הפעולה (Duty Cycle) :

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K_e \Phi} = \frac{U \cdot D - I_a R_a}{K_e \Phi}$$

$$n = \frac{U \cdot D}{K_e \Phi} - \frac{M_{em}}{9.55} \cdot \frac{R_a + R_s}{(K_e \Phi)^2}$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

המשך בעמוד 15

בלימה של מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי/זר

זרמים

בבלימה דינמית:

$$\boxed{I_b = \frac{E_b}{R_a + R_b}}$$

בבלימה בחיבור נגדי:

$$\boxed{I_b = \frac{E_b + U}{R_a + R_b}}$$

בבלימה גנרטורית:

$$\boxed{I_b = \frac{E_b - U}{R_a + R_b}}$$

* המתח במעגל העירור קבוע

זרם העוגן בבלימה	–	I_b	[A]
התנגדות העוגן	–	R_a	[Ω]
התנגדות נוספת במעגל העוגן בבלימה	–	R_b	[Ω]
הכא"מ בבלימה	–	E_b	[V]
מתח	–	U	[V]

מומנט בלימה

$$\boxed{M_{em(b)} = K_m \Phi \cdot I_b}$$

$$\boxed{M_{em(n)} = K_m \Phi \cdot I_{a(n)} = \frac{P_{em(n)}}{\omega_n}}$$

$$\boxed{M_{(n)} == \frac{P_n}{\omega_n} = 9.55 \cdot \frac{P_{(n)}}{n_{(n)}}}$$

$$\boxed{\Delta M_o == M_{em(n)} - M_{(n)}}$$

$$\boxed{M_b == M_{em(b)} + \Delta M_o}$$

$$\boxed{\omega_n == \frac{2\pi n_n}{60}}$$

מומנט אלקטרו־מגנטי נומינלי	–	$M_{em(n)}$	[Nm]
מומנט אלקטרו־מגנטי בבלימה	–	$M_{em(b)}$	[Nm]
מומנט נומינלי	–	M_n	[Nm]
איבודי מומנט בריקם	–	ΔM_o	[Nm]
מומנט בלימה	–	M_b	[Nm]
הספק נומינלי	–	P_n	[W]
הספק אלקטרו־מגנטי	–	P_{em}	[W]
מהירות נקובה	–	n_n	[rpm]
מהירות זוויתית	–	ω_n	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$

המשך בעמוד 16

זמני בלימה והתנעה

$$t_s = \frac{GD_T^2}{38.2}\left(\frac{n_2 - n_1}{M - M_s}\right)$$

$$t_b = \frac{GD_T^2}{38.2}\left(\frac{n_1 - n_2}{M + M_s}\right)$$

זמן התנעה	–	t_s	[sec]
זמן בלימה	–	t_b	[sec]
מומנט תנופה כולל המועבר לציר המנוע	–	GD_T^2	$[kgf \cdot m^2]$
מהירות סיבוב התחלתית	–	n_1	[rpm]
מהירות סיבוב סופית	–	n_2	[rpm]
מומנט סיבובי שקול בבלימה/בהתנעה	–	M	[Nm]
מומנט סטטי (נגדי)	–	M_s	[Nm]

המשך בעמוד 17

ד. מנוע השראה תלת־מופעי

<u>זרמים:</u>

$$I_{n_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta}$$

$$I'_{nph_2} = I_{nph_1} = \frac{U_{ph_1}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_T^2}}$$

$$a_{ph} = \frac{U_{ph_1}}{E_{ph_{2(0)}}} \approx \frac{I_{ph_2}}{I_{ph_1}}$$

זרם נומינלי קווי	–	I_{n_1}	[A]
גורם ההספק	–	$\cos\varphi$	
נצילות	–	η	
זרם נומינלי פאזי בסטטור	–	I_{nph_1}	[A]
זרם נומינלי פאזי ברוטור, המשוקף לסטטור	–	I'_{nph_2}	[A]
מתח פאזי בסטטור	–	U_{ph_1}	[V]
התנגדות סליל הסטטור	–	R_1	[Ω]
התנגדות סליל הרוטור המשוקף לסטטור	–	R'_2	[Ω]
ההיגב הכולל של סלילי המנוע	–	X_T	[Ω]
זרם נומינלי פאזי ברוטור	–	I_{ph_2}	[A]
כא"מ פאזי ברוטור נייח	–	$E_{ph_{2(0)}}$	[V]
יחס התמסורת	–	a_{ph}	

<u>מהירות וגורם החליקה:</u>

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

$$f_2 = f_1 \cdot s$$

$$n = n_s(1-s)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$\lambda_{max} = \frac{M_K}{M_n} = \left[\frac{s_K}{s_n} + \frac{s_n}{s_K}\right] \cdot \frac{1}{2}$$

$$s_K = s_n\left[\lambda_{max} \pm \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1}\right]$$

$$s_K = \frac{R'_2}{R_1 + X_T^2}$$

$$R'_2 = R_2 \cdot a_{ph}^2$$

$$X'_2 = X_2 \cdot a_{ph}^2$$

$$X_T = X_1 + X'_2$$

מהירות סיבוב בעומס	–	n	[rpm]
מהירות סינכרונית	–	n_s	[rpm]
גורם החליקה	–	s	
תדירות	–	f	[Hz]
מומנט קריטי	–	M_K	[Nm]
חליקה נומינלית	–	s_n	
חליקה קריטית	–	s_K	
היגב סליל הסטטור	–	X_1	[Ω]
היגב סליל הרוטור המשוקף לסטטור	–	X'_2	[Ω]

המשך בעמוד 18

הספקים, איבודי הספק ומומנטים:

$$\boxed{M_n = 9.55\,\frac{P_n}{n_n}}$$

$$\boxed{M_{em} = 9.55\,\frac{P_{em}}{n_s}}$$

$$\boxed{P_{em} = \frac{P_{mech}}{1-s} = \frac{\Delta P_{Cu_2}}{s}}$$

$$\boxed{\Delta P_{Cu_2} = P_{mech}\cdot\frac{s}{1-s} = 3\cdot I_{ph_2}^2\cdot R_2}$$

$$\boxed{\Delta P_{Cu_1} = 3\cdot I_{ph_1}^2\cdot R_1}$$

$$\boxed{P_{mech} = P_n + \Delta P_{mech}}$$

$$\boxed{P_{in} = \sqrt{3}\cdot U_n\cdot I_{n_1}\cdot\cos\varphi}$$

$$\boxed{P_n = P_{in}\cdot\eta}$$

$$\boxed{M_K = \frac{9.55\cdot 3\cdot U_{ph}^2}{2\cdot n_s\cdot X_T}}$$

$$\boxed{M = \frac{2\cdot M_K}{\dfrac{s}{s_K}+\dfrac{s_K}{s}}}$$ (נוסחת קלוס מקורבת)

$$\boxed{M_{em} = \frac{9.55\cdot 3\cdot U_{ph}^2\cdot\dfrac{R_2'}{s}}{n_s\left[\left(R_1+\dfrac{R_2'}{s}\right)^2+\left(X_1+X_2'\right)^2\right]}}$$

$$\boxed{X_T = X_1 + X_2'}$$

מומנט נומינלי	M_n	[Nm]
מומנט אלקטרו־מגנטי	M_{em}	[Nm]
מומנט קריטי	M_K	[Nm]
מהירות סיבוב נומינלית	n_n	[rpm]
מהירות סיבוב סינכרונית	n_s	[rpm]
גורם החליקה	s	
חליקה קריטית	s_K	
הספק נומינלי (מופק)	P_n	[W]
הספק חשמלי (מושקע)	P_{in}	[W]
הספק אלקטרו־מגנטי	P_{em}	[W]
הספק מכני	P_{mech}	[W]
נצילות	η	
איבודי הספק מכניים	ΔP_{mech}	[W]
איבודי הספק בנחושת בסטטור	ΔP_{Cu_1}	[W]
איבודי הספק בנחושת ברוטור	ΔP_{Cu_2}	[W]
זרם נומינלי קווי	I_{n_1}	[A]
זרם פאזי ברוטור	I_{ph_2}	[A]

המשך בעמוד 19

הכנסת נגד נוסף לרוטור מלופף:

כאשר המנוע מועמס
במומנט נקוב:

$$R_x = R_2\left(\frac{s_x}{s_n} - 1\right)$$

כאשר המנוע מועמס
במומנט כלשהו (M_x) :

$$R_x = R_2\left(\frac{M_n \cdot s_x}{M_x \cdot s_n} - 1\right)$$

$$\lambda_{max} = \frac{M_K}{M_n}$$

$$s_x = \frac{n_s - n_x}{n_s}$$

$[\Omega]$	R_x	– התנגדות פאזית נוספת ברוטור
$[\Omega]$	R_2	– ההתנגדות הפאזית של הרוטור
	s_x	– גורם החליקה במהירות מסוימת
	s_n	– גורם החליקה במהירות נומינלית
[Nm]	M_x	– מומנט
[Nm]	M_n	– מומנט נומינלי
[rpm]	n_x	– מהירות סיבוב
[rpm]	n_s	– מהירות סיבוב סינכרונית

שינוי תדירות הרשת:

$$\frac{U^*}{U} = \frac{f^*}{f}$$

$$n_s^* = \frac{60 \cdot f^*}{p} \quad ; \quad n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

המשך בעמוד 20

ה. תופעות מעבר

<u>מצבי מעבר בהתנעת מנוע זרם ישר בעירור מקבילי</u>

$$n_o = \frac{U}{K_e\,\phi}$$

$$T = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{R}{K_e\,K_m\,\phi^2}$$

$$R = R_a + R_s$$

$$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e\,K_m\,\phi^2}$$

$$n = n_L + \left(n_{st} - n_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$n_L = n_o - \Delta n_L$$

$$n_L = n_o - \frac{I_L\,R}{K_e\,\phi}$$

$$n_{st} = n_o - \frac{I_{st}\,R}{K_e\,\phi}$$

$$I_L = \frac{M_L}{K_m\,\phi}$$

$$i = I_L + \left(I_{st} - I_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$M = M_L + \left(M_{st} - M_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

מהירות סיבוב בריקס	n_o	[rpm]
שטף בסליל העירור	ϕ	[Wb]
מתח הדקים	U	[V]
קבוע זמן אלקטרומכני	T	[sec]
מקדמים	K_e , K_m	
מומנט תנופה	GD^2	$[kgf \cdot m^2]$
ההתנגדות הכוללת של מעגל העוגן	R	$[\Omega]$
התנגדות סליל העוגן	R_a	$[\Omega]$
התנגדות המתנע במעגל העוגן	R_s	$[\Omega]$
שינוי מהירות כתוצאה מעומס	Δn_L	[rpm]
זמן	t	[sec]
מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)	n_{st}	[rpm]
מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L	n_L	[rpm]
זרם המתאים למומנט נגדי M_L	I_L	[A]
זרם המנוע בהתנעה	I_{st}	[A]
זרם רגעי של המנוע	i	[A]
מומנט המתפתח על־ידי המנוע בזמן התנעה	M_{st}	$[kgf \cdot m]$
מומנט העומס בזמן התנעה (מומנט נגדי)	M_L	$[kgf \cdot m]$

המשך בעמוד 21

בלימה דינמית של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

$$n = -\Delta n_L + \left(n_{st} + \Delta n_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$\Delta n_L = \frac{M_L R}{K_e\, K_m\, \phi^2} = \frac{I_L\, R}{K_e\, \phi}$$

$$R = R_a + R_b$$

$$T = \frac{GD^2}{38.2}\, \frac{R}{K_e\, K_m\, \phi^2}$$

כאשר $U = 0$:

$$n_{st} = \frac{I_{st}\, R}{K_e\, \phi}$$

$$i = I_L - \left(I_{st} + I_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L, בערך מוחלט	–	Δn_L	[rpm]
התנגדות כוללת במעגל העוגן	–	R	[Ω]
התנגדות סליל העוגן	–	R_a	[Ω]
התנגדות נגד הבלימה	–	R_b	[Ω]
מומנט העומס בזמן בלימה (מומנט נגדי)	–	M_L	[kgf · m]
שטף בסליל העירור	–	ϕ	[Wb]
קבוע זמן אלקטרומכני	–	T	[sec]
מומנט תנופה	–	GD^2	[kgf · m²]
מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)	–	n_{st}	[rpm]
זמן	–	t	[sec]
זרם המתאים לעומס נגדי M_L	–	I_L	[A]
זרם המנוע בתחילת הבלימה	–	I_{st}	[A]
זרם רגעי של המנוע	–	i	[A]

המשך בעמוד 22

בלימה על־ידי חיבור נגדי של מנוע זרם ישר בעירור מקבילי

א. ללא הפיכת קוטביות

$$n = n_L + \left(n_{st} - n_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$n_L = n_n \frac{U - I_a R}{U - I_a R_a}$$

$$R = R_a + R_b$$

[rpm]	n	–	מהירות סיבוב
[rpm]	n_L	–	מהירות סיבוב המתאימה למומנט העומס M_L
[rpm]	n_{st}	–	מהירות סיבוב בזמן בלימה (ברגע $t = 0$)
[sec]	t	–	זמן
[sec]	T	–	קבוע זמן אלקטרומכני
[rpm]	n_n	–	מהירות סיבוב נקובה
[V]	U	–	מתח הדקים
[A]	I	–	זרם העוגן
[Ω]	R	–	התנגדות כוללת במעגל העוגן
[Ω]	R_a	–	התנגדות סליל העוגן
[Ω]	R_b	–	התנגדות נגד הבלימה

ב. עם הפיכת קוטביות

$$n = -n_o - \Delta n_L + \left(n_o + n_{st} + \Delta n_L\right) e^{-\frac{t}{T}}$$

$$i = I_L - (I_{st} + I_L)\, e^{-\frac{t}{T}}$$

$$I_{st} = \frac{U + E_{st}}{R}$$

[V]	E_{st}	–	כא"מ מושרה בתחילת הבלימה
[rpm]	n_o	–	מהירות סיבוב בריקם
[rpm]	Δn_L	–	מפל מהירות הסיבוב כתוצאה מעומס M_L, בערך מוחלט
[rpm]	n_{st}	–	מהירות סיבוב בזמן התנעה (ברגע $t = 0$)
[A]	i	–	זרם רגעי של המנוע
[A]	I_L	–	זרם המתאים למומנט נגדי M_L
[A]	I_{st}	–	זרם המנוע בתחילת הבלימה

בהצלחה!

מדינת ישראל
משרד החינוך

סוג הבחינה: גמר לבתי־ספר לטכנאים ולהנדסאים
מועד הבחינה: אביב תשע"ה, 2015
נספח לשאלון: 733913

אין להעביר את הנוסחאון לנבחן אחר

מקום למדבקת נבחן

נוסחאון באלקטרוניקה של מערכות הספק לכיתה י"ד

(12 עמודים)

1. אותות מחזוריים

1.1 ערך ממוצע – הגדרה כללית

$$I_{AV} = \overline{i(t)} = < i(t) > = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt$$

$$V_{AV} = \overline{v(t)} = < v(t) > = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)\,dt$$

$$P_{AV} = \overline{p(t)} = < p(t) > = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\,dt$$

זרם ממוצע – I_{AV} [A]

מתח ממוצע – V_{AV} [V]

הספק ממוצע (הספק יעיל) – P_{AV} [W]

זמן מחזור – T [sec]

המשך בעמוד 2

1.2 ערך ממוצע של אותות סינוסואידליים

זרם:

$$\boxed{i(t) = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_I\right)}$$

$$\boxed{I_{AV} = 0}$$

ערך רגעי של הזרם – $i(t)$ [A]

הערך המרבי של הזרם – I_m [A]

תדר זוויתי – ω $\left[\frac{rad}{sec}\right]$

זווית המופע של הזרם – φ_I [rad] / [°]

הזרם הממוצע – I_{AV} [A]

מתח:

$$\boxed{v(t) = V_m \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_V\right)}$$

$$\boxed{V_{AV} = 0}$$

ערך רגעי של המתח – $v(t)$ [V]

הערך המרבי של המתח – V_m [V]

זווית המופע של המתח – φ_V [rad] / [°]

המתח הממוצע – V_{AV} [V]

הספק:

$$\boxed{p(t) = v(t) \cdot i(t) = I_m \cdot V_m \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_I\right) \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_V\right)}$$

ערך רגעי של ההספק – $p(t)$ [W]

$$\boxed{P = P_{AV} = \frac{I_m \cdot V_m}{2} \cos\left(\varphi_V - \varphi_I\right) = V \cdot I \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_I\right)}$$

ההספק הממוצע
(ההספק היעיל) – $P = P_{AV}$ [W]

המשך בעמוד 3

1.3 ערך ממוצע של גל מלבני

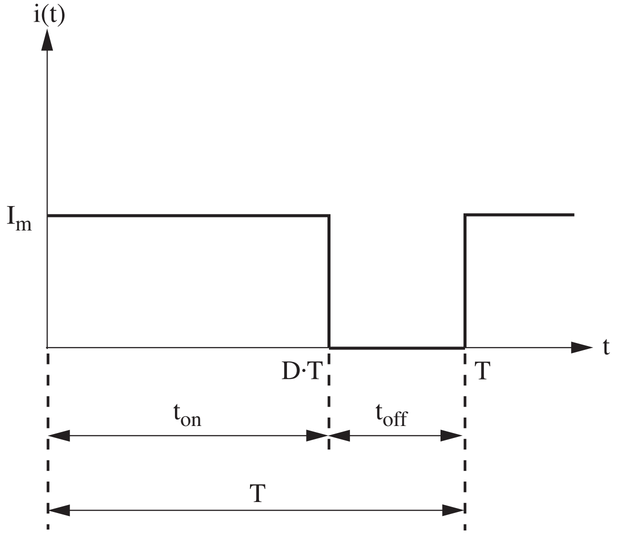
זרם:

$$i(t)=\begin{cases} I_m & , \quad 0 \le t \le D\cdot T \\ 0 & , \quad D\cdot T < t \le T \end{cases}$$

$$I_{AV} = D \cdot I_m$$

$$t_{on} = D \cdot T$$

$$t_{off} = (1-D) \cdot T$$



D – מחזור הפעולה (Duty Cycle)

[sec] t_{on} – זמן הולכה

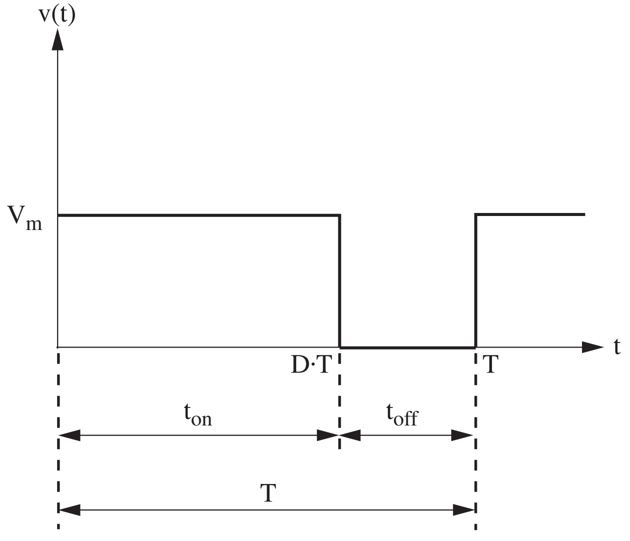
[sec] t_{off} – זמן פוגה

[sec] T – זמן מחזור

מתח:

$$v(t)=\begin{cases} V_m & , \quad 0 \le t \le D\cdot T \\ 0 & , \quad D\cdot T < t \le T \end{cases}$$

$$V_{AV} = D \cdot V_m$$



המשך בעמוד 4

1.4 ערך יעיל – הגדרה כללית

זרם:

$$\boxed{I_{RMS} = I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt}}$$

$[A]$ $I_{RMS} = I$ – הערך היעיל של הזרם

$[sec]$ T – זמן מחזור

מתח:

$$\boxed{V_{RMS} = V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)\,dt}}$$

$[V]$ $V_{RMS} = V$ – הערך היעיל של המתח

1.5 ערך יעיל של אותות סינוסואידליים

זרם:

$$\boxed{I_{RMS} = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}}$$

$[A]$ I_m – הערך המרבי של הזרם

מתח:

$$\boxed{V_{RMS} = V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}}$$

$[V]$ V_m – הערך המרבי של המתח

1.6 ערך יעיל של גל מלבני

זרם:

$$\boxed{I_{RMS} = I = \sqrt{D}\cdot I_m}$$

D — מחזור הפעולה (Duty Cycle)

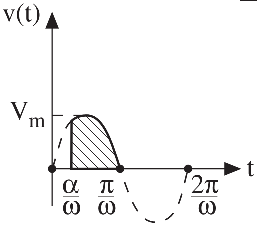
מתח:

$$\boxed{V_{RMS} = V = \sqrt{D}\cdot V_m}$$

המשך בעמוד 5

2. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין חד־מופעיים

2.1 מיישר מבוקר חד־דרכי (בקרת חצי גל) בעומס אומי



$$\boxed{v(t) = V_m \cdot \sin \omega t}$$

$$\boxed{0 \le \alpha \le \pi}$$

$$\boxed{V_{AV} = \frac{V_m}{2\pi}(1+\cos\alpha)}$$

$$\boxed{V_{AV_m} = \frac{V_m}{\pi}}$$

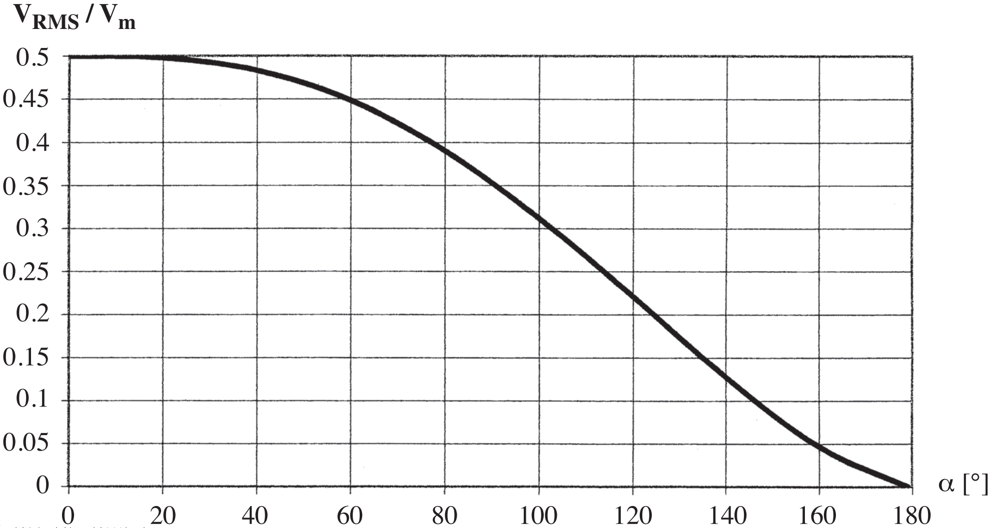
$$\boxed{V_{RMS} = \frac{V_m}{2}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)}}$$

$$\boxed{V_{RMS_m} = \frac{V_m}{2}}$$

$$\boxed{P = \frac{V_{RMS}^2}{R}}$$

$$\boxed{I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}} \quad ; \quad \boxed{I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}}$$

זווית הצתה	– α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	– $v(t)$	[V]
הערך המרבי של המתח	– V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח	– V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	– V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח	– V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	– V_{RMS_m}	[V]
תדר זוויתי	– ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
זמן	– t	[sec]
התנגדות העומס	– R	[Ω]
הספק על העומס	– P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	– I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	– I_{RMS}	[A]



המשך בעמוד 6

2.2 בקרת גל שלם לא מיושר בעומס אומי

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$0 \le \alpha \le \pi$$

$$V_{AV} = 0$$

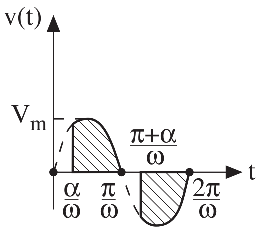
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)}$$

$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

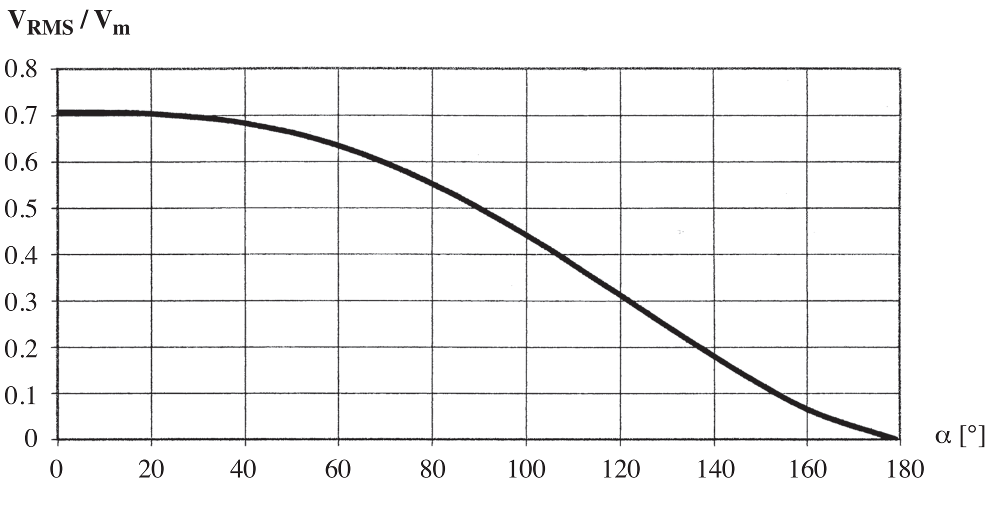
$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$I_{AV} = 0$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$



[rad]	α	–	זווית הצתה
[V]	$v(t)$	–	מתח הגל בתלות בזמן
[V]	V_m	–	הערך המרבי של המתח
[V]	V_{AV}	–	הערך הממוצע של המתח
[V]	V_{RMS}	–	הערך היעיל של המתח
[V]	V_{RMS_m}	–	הערך המרבי של המתח היעיל
$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	ω	–	תדר זוויתי
[sec]	t	–	זמן
[Ω]	R	–	התנגדות העומס
[W]	P	–	הספק על העומס
[A]	I_{AV}	–	הערך הממוצע של הזרם
[A]	I_{RMS}	–	הערך היעיל של הזרם



המשך בעמוד 7

2.3 מיישר מבוקר דו־דרכי (בקרת גל שלם מיושר) בעומס אומי

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{V_m}{\pi}(1+\cos\alpha)$$

$$V_{AV_m} = \frac{2\,V_m}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right)}$$

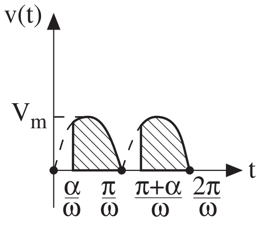
$$V_{RMS_m} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

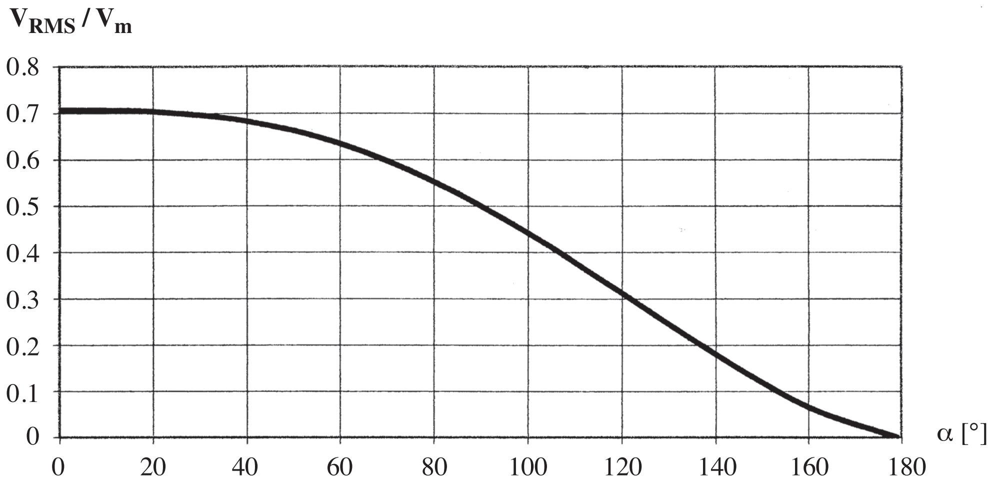
$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R}$$

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

$$0 \le \alpha \le \pi$$



זווית הצתה	–	α	[rad]
מתח הגל בתלות בזמן	–	$v(t)$	[V]
הערך המרבי של המתח	–	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח	–	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	–	V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח	–	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	–	V_{RMS_m}	[V]
תדר זוויתי	–	ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
זמן	–	t	[sec]
התנגדות העומס	–	R	[Ω]
הספק על העומס	–	P	[W]
הערך הממוצע של הזרם	–	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם	–	I_{RMS}	[A]



המשך בעמוד 8

3. בקרת הספק במעגלי זרם חילופין תלת־מופעיים

3.1 מיישר מבוקר תלת־מופעי בחיבור כוכב בעומס אומי

פעולה רציפה:

$$0 \le \alpha \le \frac{\pi}{6}$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{2\,\pi} \cdot \cos\alpha$$

$$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3}\,V_m}{2\,\pi}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\,\pi} \cdot \cos 2\alpha}$$

$$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\,\pi}}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R} \quad ; \quad I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

פעולה לא רציפה:

$$\frac{\pi}{6} < \alpha \le \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{3\,V_m}{2\,\pi}\left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right)\right]$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{5}{24} - \frac{\alpha}{4\,\pi} + \frac{1}{8\,\pi}\sin\left(\frac{\pi}{3} + 2\,\alpha\right)}$$

זווית הצתה	α	[rad]
מתח מופעי בתלות בזמן	$v(t)$	[V]
תדר זוויתי	ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
זמן	t	[sec]
הערך המרבי של המתח המופעי	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח על העומס	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח על העומס	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	V_{RMS_m}	[V]
התנגדות העומס	R	[Ω]
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	I_{RMS}	[A]

המשך בעמוד 9

3.2 מיישר מבוקר תלת־מופעי בחיבור גשר בעומס אומי

פעולה רציפה:

$$0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3}\ V_m}{\pi} \cdot \cos\alpha$$

$$V_{AV_m} = \frac{3\sqrt{3}\ V_m}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{3}{4\,\pi}\left(\frac{2\,\pi}{3} + \sqrt{3} \cdot \cos 2\alpha\right)}$$

$$V_{RMS_m} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{\frac{3}{4\,\pi}\left(\frac{2\,\pi}{3} + \sqrt{3}\right)}$$

$$I_{AV} = \frac{V_{AV}}{R} \quad ; \quad I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

פעולה לא רציפה:

$$\frac{\pi}{3} < \alpha \le \pi$$

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t$$

$$V_{AV} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi}\left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$V_{RMS} = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \cdot \sin\left(2\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)}$$

זווית הצתה	–	α	[rad]
מתח מופעי בתלות בזמן	–	$v(t)$	[V]
מהירות זוויתית (תדר זוויתי)	–	ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$
זמן	–	t	[sec]
הערך המרבי של המתח המופעי	–	V_m	[V]
הערך הממוצע של המתח על העומס	–	V_{AV}	[V]
הערך המרבי של המתח הממוצע	–	V_{AV_m}	[V]
הערך היעיל של המתח על העומס	–	V_{RMS}	[V]
הערך המרבי של המתח היעיל	–	V_{RMS_m}	[V]
התנגדות העומס	–	R	[Ω]
הערך הממוצע של הזרם העובר דרך העומס	–	I_{AV}	[A]
הערך היעיל של הזרם העובר דרך העומס	–	I_{RMS}	[A]

המשך בעמוד 10

4. ממירים ממותגים

4.1 משוואת מתח־זרם של סליל

$$\boxed{v_L = L\frac{di_L}{dt}}$$

(כאשר השינוי בזרם הסליל הוא לינארי)

$$\boxed{V_L = L\frac{\Delta I_L}{\Delta T}}$$

4.2 משוואת מתח־זרם של קבל

$$\boxed{i_C = C\frac{dv_C}{dt}}$$

(כאשר השינוי במתח הקבל הוא לינארי)

$$\boxed{I_C = C\frac{\Delta V_C}{\Delta T}}$$

מתח רגעי על הסליל	–	v_L	[V]
זרם רגעי בסליל	–	i_L	[A]
זמן	–	t	[sec]
השראות הסליל	–	L	[H]
מתח על הסליל	–	V_L	[V]
השינוי בזרם הסליל	–	ΔI_L	[A]
השינוי בזמן	–	ΔT	[sec]
זרם רגעי בקבל	–	i_C	[A]
מתח רגעי על הקבל	–	v_C	[V]
קיבול הקבל	–	C	[F]
זרם הקבל	–	I_C	[A]
השינוי במתח על הקבל	–	ΔV_C	[V]

4.3 ממיר STEP DOWN (BUCK)

$$\boxed{D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}}$$

בממיר אידיאלי:

$$\boxed{V_o = D \cdot V_{in}}$$

$$\boxed{I_o = \frac{I_{in}}{D}}$$

$$\boxed{L = \frac{(V_{in} - V_o)}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T}$$

$$\boxed{C = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{T^2 (1 - D)}{8\,L}}$$

$$\boxed{P_o = \eta \cdot P_{in}}$$

מחזור הפעולה (Duty Cycle)	–	D	
זמן פעולה	–	t_{on}	[sec]
זמן פוגה	–	t_{off}	[sec]
זמן מחזור	–	T	[sec]
מתח מוצא	–	V_o	[V]
מתח מבוא	–	V_{in}	[V]
זרם מוצא	–	I_o	[A]
זרם מבוא	–	I_{in}	[A]
אדוות־המתח הדרושה	–	ΔV_o	[V]
הספק במוצא	–	P_o	[W]
הספק במבוא	–	P_{in}	[W]
נצילות	–	η	

המשך בעמוד 11

4.4 ממיר STEP UP (BOOST)

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

בממיר אידיאלי:

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

$$I_o = (1 - D) \cdot I_{in}$$

$$C = \frac{I_o}{\Delta V_o} \cdot D \cdot T$$

$$L = \frac{V_{in}}{\Delta I_L} \cdot D \cdot T$$

$$P_o = \eta \cdot P_{in}$$

	D –	מחזור הפעולה (Duty Cycle)
[sec]	t_{on} –	זמן פעולה
[sec]	t_{off} –	זמן פוגה
[sec]	T –	זמן מחזור
[V]	V_o –	מתח מוצא
[V]	V_{in} –	מתח מבוא
[A]	I_o –	זרם מוצא
[A]	I_{in} –	זרם מבוא
[F]	C –	קיבול הקבל
[V]	ΔV_o –	אדוות־המתח הדרושה
[H]	L –	השראות הסליל
[A]	ΔI_L –	השינוי בזרם הסליל
[W]	P_o –	הספק במוצא
[W]	P_{in} –	הספק במבוא
	η –	נצילות

4.5 ממיר FLYBACK

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

בממיר אידיאלי:

$$V_o = \frac{n \cdot D}{1 - D} \cdot V_{in}$$

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

n – יחס הליפופים בין הסליל השניוני ובין הסליל הראשוני

N_1 – מספר הליפופים בסליל הראשוני

N_2 – מספר הליפופים בסליל השניוני

המשך בעמוד 12

5. מהפכים חד־מופעיים

מהפך חצי גשר (H/2) :

$$V_o = \frac{V_{in}}{2}$$

[V] V_o – הערך היעיל של מתח המוצא

[V] V_{in} – הערך היעיל של מתח המבוא

מהפך גשר מלא (H) :

$$V_o = V_{in}$$

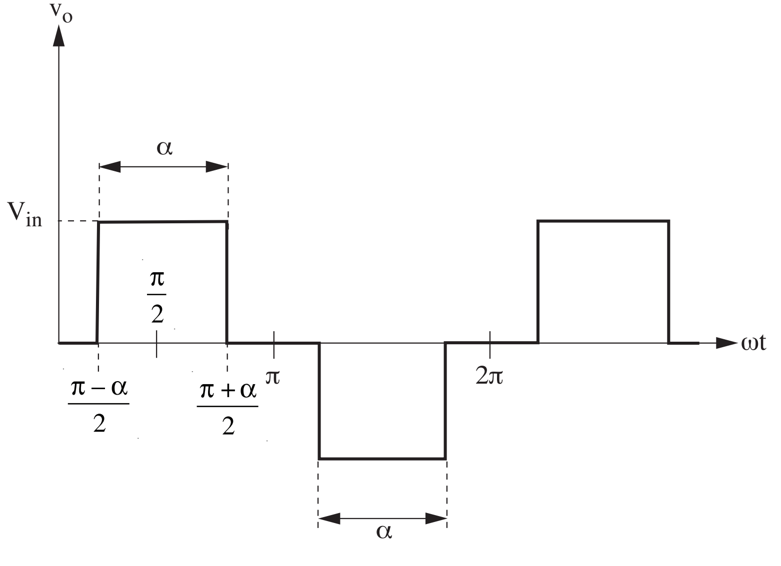
6. אפנון רוחב דופק יחיד (SPWM)

$$V_o = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} V_{in}^2 \, d(\omega t)}$$

$$V_o = V_{in} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$$

[V] V_o – מתח יעיל

[V] v_o – מתח רגעי



בהצלחה!

נספח: מילון מונחים (2 עמודים)

לשאלון 733913, אביב תשע"ה

המונח	תרגום המונח		
	ערבית	רוסית	אנגלית
אדוות המתח	جهد تَمَوُّج	Девиация напряжения	voltage ripple
הארקת שיטה	نظام تأريض	Метод заземления	system grounding
הספק היגבי	قدرة ارتكاسيّة	Реактивная мощность	reactive power
הספק פעיל	قدرة فعّالة	Активная мощность	active power
השראות	مُحاثّة	Индуктивность	inductance
התקן חשמלי	جهاز كهربائيّ	Электрическое устройство	electrical device
ויסות מתח	تنظيم الجهد	Регулировка напряжения	voltage regulation
מומנט	عزم	Момент	torque
ממיר ממותג	مُحَوِّل تبديل	Коммутируемый преобразователь	switching converter
מנוע השראה תלת־מופעי	مُحرِّك الحثّ ثلاثيّ المرحلة	Трёхфазный двигатель	three-phase induction motor
מנוע סינכרוני	مُحرِّك متزامن	Синхронный двигатель	synchronous motor
מעגל תמורה	دائرة التعويض	Схема замещения	equivalent circuit
מפל המתח על המברשות	انخفاض / نزول الجهد على الفرش	Падение напряжения на щётках	the voltage drop on the brushes
מתחי יתר	الجهد الزائد	Перенапряжение	over-voltage
נצילות נקובה	الكفاءة الاسميّة	Номинальный коэффициент полезного действия	nominal efficiency
נקודת האפס	نقطة الصفر	Нулевая точка	neutral point

המשך בעמוד 2

המונח	תרגום המונח		
	ערבית	רוסית	אנגלית
עומס נקוב	حمل اسميّ	Номинальная нагрузка	nominal load
עירור זר	إثارة خارجيّة	Внешнее возбуждение	external excitation
ענף המיגנוט	قطاع المغنطة	Намагничивающая цепь	magnetization branch
קוטביות מתח הקבל	قطبيّة جهد المُكَثِّف	Полярность напряжения конденсатора	capacitor voltage polarity
קומוטציה	توحيد	Коммутация	commutation
קיבול	سعة	Ёмкость	capacitance
קֶצֶר חד־מופעי	قصر وحيد / أحاديّ الطور	Однофазное замыкание	single phase short circuit
רוטור מלופף	الدوّار الملفوف	Ротор с намоткой	wound rotor
ריקם	لا حمل	Холостой ход	no-load
רשת חלוקה	شبكة التوزيع	Распределительная сеть	distribution network
רשת תלת־מופעית	شبكة ثلاثيّة الأطوار	Трёхфазная сеть	three-phase network
שטח־חתך אחיד	مساحة مقطع عرضيّ مُوَحَّد	Однородное сечение	uniform cross-sectional area
תחנת השנאה	محطّة تحويل	Трансформаторная станция	transformation station
תרשים חד־קווי	تخطيط أحاديّ السطر	Однолинейная схема	one-line chart